



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjon og Materialer - fordypning Bygg	Vårsemesteret, 2011 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Qasim Ali (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså	
Veiledere: Kjell Tore Fosså og Magne Maage (Skanska Norge ASA)	
Tittel på masteroppgaven: Motstand mot kloridinntrengning i betong med blandingsementer, flygeaske og silikastøv Engelsk tittel: <i>Resistance against chloride ingress in concrete with blended cements, fly ash and silica fume</i>	
Studiepoeng: 30 sp	
Emneord: Kloridbestandig betong, flygeaske, Diffusjonskoeffisient, elektrisk motstandsevne	Sidetall: ...81... + vedlegg/annet: ...137..... Stavanger, ...20-06-2011..... dato/år

Masteroppgave 2011

Motstand mot kloridinntrengning i betong med blandingsementer, flygeaske og silikastøv

*Resistance against chloride ingress in concrete with blended
cements, fly ash and silica fume*



Utført av: Qasim Ali

MASTEROPPGAVE 2011

for

Qasim Ali

Motstand mot kloridinntrenging i betong med blandingssementer, flygeaske og silikastøv
Resistance against chloride ingress in concrete with blended cements, fly ash and silica fume

Innledning

Bruk av blandingssementer og tilsetning av flygeaske, slagg og silikastøv ved blanding av betong, er økende. Det er spesielt miljømessige forhold som er drivkrafta bak dette. I tillegg vil betongens egenskaper, både i fersk og herda tilstand, endre seg. Inntrenging av klorider reduseres ved bruk av pozzolane tilsetningsmaterialer. Flygeaske fører til mer langsom utvikling av egenskaper i tidlig fase.

Oppgave

Oppgava går ut på å studere betong med blandingssement, flygeaske og silikastøv, først og fremst med hensyn på motstand mot kloridinntrenging. Oppgava omfatter et studium både av nasjonal og internasjonal litteratur på området. Et laboratorie-opplegg skal planlegges og gjennomføres, der mellom anna kloridinntrenging på relativt ung betong skal undersøkes.

Gjennomføring

Oppgaven utføres i samarbeid mellom Universitet i Stavanger og Skanska Norge AS. Fagansvarlig ved UiS er Kjell Tore Fosså og veileder hos Skanska er Magne Maage og Sverre Smeplass. Gjennomføringen av oppgava skal tilpasses de ressurser som stilles til disposisjon. Arbeidet koordineres med pågående arbeid ved Statens Vegvesen.

Oppgaven er utlevert 1. februar 2011, og skal innleveres til Institutt for konstruksjonsteknikk og materialteknologi innen 15. juni 2011.

2011-02-01 Magne Maage

Forord

Formålet med oppgaven har vært å støpe ut blandingssement tilsatt flygeaske og silikastøv for å analysere motstand mot kloridinntrengning, elektrisk motstand og trykkfasthet i tidlig alder. Kloridinntrengning i betongkonstruksjoner kan forårsake armeringskorrosjon, derfor er det viktig å få god tetthet på den støpte betongen. Dette er nødvendig for å sikre god bestandighet, slik at betongen tåler miljøpåkjenning i et aggressivt miljø. Laboratorieeksperimenter er utført ved hjelp av NT Build 443 og SINTEF prosedyre for elektrisk motstand. Eksperimentene ble utført for å finne diffusjonskoeffisienter og elektrisk motstandsevne for støpt betong.

Oppgaven er gjennomført i samarbeid med Skanska Norge AS, og er en del av videreutviklingsarbeid av kloridbestandig betong i Norge. Arbeidet med oppgaven har i stor grad foregått på betong- og kjemilaboratoriene ved Universitet i Stavanger.

Dette har vært et lærerikt halvår hvor jeg har fått mye større innsikt i prosjektering av betongkonstruksjoner i marine miljø mot armeringskorrosjon. Utfordringene med manglende utstyr og erfaring, samt tidspress har hjulpet meg til å få en brattere læringskurve. Jeg håper mitt lille bidrag kan være nyttig i arbeidet videre for kloridbestandig betong.

Jeg vil spesielt takke Magne Maage, Kjell Tore Fosså, Bård Pedersen og Tone Anita Østnor for hjelp underveis med oppgaven.

Stavanger 20. juni 2011

Qasim Ali

Innholdsfortegnelse

FORORD.....	I
FIGURLISTE.....	V
TABELL LISTE.....	VII
SAMMENDRAG	VIII
1. INNLEDNING	1
2. BAKGRUNN, PROBLEMSTILLING OG MÅLSETTING	2
2.1 Bakgrunn	2
2.2 Problemstilling	3
2.3 Målsetning, forventning og avgrensning	3
2.4 Eksempler	4
2.4.1 Bjørvikaprojektet	4
2.4.2 Tjuvholmenprosjektet	6
2.5 Varmeutvikling og Lavvarmebetong.....	7
2.6 Høy flygeaske betong og permabilitet	8
3. NEDBRYTNINGSMEKANISMER – ARMERINGSKORROSJON	10
3.1 Generelt	10
3.2 Kloridinntrengning	11
3.2.1 Kloriddiffusivitet, D_0	12
3.2.2 Innvirkning av silikastøv	13
3.2.3 Innvirkning av flygeaske.....	13
3.2.4 Innvirkning av høyere herde temperatur og v/c	14
3.3 Elektrisk motstandsevne	15
3.3.1 Innvirkning av sement type.....	15
3.3.2 Innvirkning av v/c -forholdet.....	16
3.3.3 Innvirkning av herdetemperatur.....	17
3.3.4 Innvirkning av Flygeaske og silikastøv	17
4. BAKGRUNN FOR EKSPERIMENTELTARBEID	20
4.1 Generelt	20
4.2 Delmaterialer	20
4.2.1 Anleggsement.....	20
4.2.2 Anleggsement FA.....	21
4.2.3 Silikastøv	21
4.2.4 Flygeaske.....	22
4.2.5 Tilslag.....	23

4.2.6 SP- tilsetningsstoffer.....	23
4.3 Forsøksmatrise	24
5. EKSPERIMENTELT ARBEID	25
5.1 Eksperimentelle forhold	25
5.2 Programoppbygging, type resepter	25
5.3 Blanding og utstøping av betong	26
5.4 Tidsplan for forsøkene	27
5.5 Fersk betong støplighet	27
5.6 Trykkfasthet	28
5.7 Elektrisk motstand	29
5.7.1 Beskrivelse av forsøket	29
5.7.2 Beregning	29
5.8 Kloridinntrengning	31
5.8.1 Tildanning av prøvelegmer	31
5.8.2 Spektrofotometrisk Analyse	34
5.8.3 Ficks'2 lov	36
5.8.4 Beregning av kloridinnhold i en sjiktprøve	37
6. RESULTATER	38
6.1 Egenskaper for fersk betong	38
6.2 Trykkfasthet	38
6.3 Elektriskmotstand	39
6.4 Kloridinntrengning	40
7. DISKUSJON AV RESULTATER	44
7.1 Elektriskmotstand	44
7.1.1 Effekt av sement	44
7.1.2 Effekt av flygeaske	48
7.1.3 Effekt av silikastøv	52
7.2 Trykkfasthet	55
7.2.1 Generelt	55
7.2.2 Effekt av sementtype	56
7.2.3 Effekt av flygeaske	58
7.2.4 Effekt av silikainnhold	61
7.3 Kloridinntrengning	63
7.3.1 Effekt av sementtype	64
7.3.2 Effekt av flygeaske	68
7.3.3 Effekt av Silikastøv	72

7.4 Feilkilder	77
8. KONKLUSJON	78
FORSLAG TIL VIDERESTUDIE.....	80
REFERANSER	81
VEDLEGG	83

Figurliste

Figur 2. 1 Bjørvikasenketunell [24]	5
Figur 2. 2 Tjuvholmen [2]	6
Figur 2. 3 Parkeringsanlegg ved Tjuvholmen [2]	7
Figur 3. 1 Armering i passiv tilstand, b) oppsprekking c) avskalling av betong [25]	10
Figur 3. 2 Nedbrytningsprosessen frem til kollaps [25]	11
Figur 3. 3 Innvirkning av sementtype på elektriskledningsevne [15]	16
Figur 3. 4 Innvirkning av v/c tall på elektrisk motstandsevne [15]	16
Figur 3. 5 Innvirkning av herde temperatur på elektrisk motstandsevne [15]	17
Figur 3. 6 Innvirkning av Silikastøv på elektriskmotstand [15]	18
Figur 5. 1 Måling av synkmål	28
Figur 5. 2 Utstyr for trykkprøving	28
Figur 5. 3 Viser tegning av system kretsen for måling av elektriske motstandsevne.	29
Figur 5. 4 Viser utstyr for måling av elektrisk motstandsevne.	31
Figur 5. 5 Tildanning av prøvelegemet iht. prosedyre	31
Figur 5. 6 Prøvestykkene påføres epoxy maling	32
Figur 5. 7 Prøvestykkene påføres epoksy maling	32
Figur 5. 8 Freseutstyr m/ roterende betongbor	33
Figur 5. 9 Freseutstyr med betongbor	33
Figur 5. 10 Kalibreringskurve	34
Figur 5. 11 Blandinger klar for spektrofotometer analyse	35
Figur 5. 12 Spektrofotometer	36
Figur 5. 13 Eksempel på kloridprofil	37
Figur 7. 1 Sammenligning av AN-FA 4 og AN-1, Sementinnvirkning	46
Figur 7. 2 Sammenligning av AN-FA 5 og AN-2, Sementinnvirkning	46
Figur 7. 3 Sammenligning av AN-FA 2 og AN-3, Sementinnvirkning	47
Figur 7. 4 Sammenligning av AN-FA 6 og AN-4, Sementinnvirkning	48
Figur 7. 5 Sammenligning av AN-FA 1, AN-FA 2 og AN-FA 3, flygeaskeinnvirkning	50
Figur 7. 6 Sammenligning av AN-FA 4, AN-FA 5 og AN-FA 6, flygeaskeinnvirkning	51
Figur 7. 7 Sammenligning av AN-1, AN-2 og AN-4, flygeaskeinnvirkning	51
Figur 7. 8 Sammenligning av AN-FA 4 og AN-FA 1, silikastøvinnvirkning	53
Figur 7. 9 Sammenligning av AN-FA 2 og AN-FA 5, silikastøvinnvirkning	54
Figur 7. 10 Sammenligning av AN-FA 3 og AN-FA 6, silikastøvinnvirkning	54
Figur 7. 11 Sammenligning av AN-2 og AN-3, silikastøvinnvirkning	55
Figur 7. 12 Sammenligning av AN 1 og AN-FA 4	57
Figur 7. 13 Sammenligning av AN 3 og AN-FA 2	57
Figur 7. 14 Sammenligning av AN 4 og AN-FA 6	58

Figur 7. 15 Sammenligning av AN-FA 1,2 & 3.....	59
Figur 7. 16 Sammenligning av AN-FA 4,5 & 6.....	60
Figur 7. 17 Sammenligning av AN-1,2 & 4.....	60
Figur 7. 18 Sammenligning av AN-FA 1 og AN-FA 4.....	62
Figur 7. 19 Sammenligning av AN-FA 5 og AN-FA 2.....	62
Figur 7. 20 Sammenligning av AN-FA 3 og AN-FA 6.....	63
Figur 7. 21 Kloridprofiler for 1 og 2	66
Figur 7. 22 Kloridprofiler for 3 og 4	66
Figur 7. 23 Kloridprofiler for 5 og 6	67
Figur 7. 24 Kloridprofiler for 7 og 8	68
Figur 7. 25 Kloridprofiler for 1, 2 og 4	70
Figur 7. 26 Kloridprofiler for 5,7 og 9	71
Figur 7. 27 Kloridprofiler for 6,8 og 10	72
Figur 7. 28 Kloridprofiler for 1 og 2	74
Figur 7. 29 Kloridprofiler for 3 og 4	74
Figur 7. 30 Kloridprofiler for 5 og 6	75
Figur 7. 31 Kloridprofiler for 7 og 8	76

Tabell liste

Tabell 3. 1 Sammenheng mellom Diffusjonskoeffisient og kloridmotstandsevne [3].....	13
Tabell 3. 2 Effekt av silikastøv på elektriskmotstand [18].....	18
Tabell 3. 3 Effekt av flygeaske på elektriskmotstand [18].....	19
Tabell 4. 1 Norcem Anlegg produktinformasjon [26].....	21
Tabell 4. 2 Norcem Anlegg FA produktinformasjon [27]	21
Tabell 4. 3 Forsøksmatrise	24
Tabell 5. 1	27
Tabell 6. 1 Konsistens ved ulike doseringer pozzolaner	38
Tabell 6. 2 Trykkfasthet (MPa) ved 28 døgns alder	38
Tabell 6. 3 Elektrisk motstand i ohmmeter (Ωm), lagret ved 20 oC i vannbad	39
Tabell 6. 4 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-28-20-0 & AN-FA-20-28-35-0.....	40
Tabell 6. 5 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-28-50-0.....	40
Tabell 6. 6 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-40-14-20-5 og AN-FA-20-28-20-5	41
Tabell 6. 7 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-14-35-5 og AN-FA-40-14-35-5.....	41
Tabell 6. 8 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-28-35-5 og AN-FA-20-14-50-5	42
Tabell 6. 9 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-14-50-5 og AN-FA-20-28-50-5	42
Tabell 6. 10 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-20-28-20-5 og AN-20-28-35-5.....	43
Tabell 6. 11 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-20-28-35-0 og AN-20-28-50-5.....	43
Tabell 7. 1 Effekt av sement på elektrisk motstandsevne, Ωm	44
Tabell 7. 2 Effekt av flygeaske på elektrisk motstandsevne, Ωm	48
Tabell 7. 3 Effekt av silikastøv på elektrisk motstandsevne, Ωm	52
Tabell 7. 4 Effekt av sementtype på elektrisk motstandsevne , Ωm	56
Tabell 7. 5 Effekt av flygeaske på trykkfasthet , MPa	58
Tabell 7. 6 Effekt av silikastøv på elektrisk motstandsevne , Ωm	61
Tabell 7. 7 Feilprøver	64
Tabell 7. 8 Effekt av sementtype på Do	65
Tabell 7. 9 Effekt av flygeaske på Do	69
Tabell 7. 10 Effekt av silikastøv på D0	73

Sammendrag

Oppgaven presenterer resultater fra et eksperimentelt arbeid som omfatter ”kloridbestandigbetong” også kalt betong med blandingssement. I forsøksprogrammet har egenskaper som kloridinntrengning, elektrisk motstand og 28 døgns fasthet blitt bestemt for forskjellige bindemiddelsammensetninger ved å justere på følgende parametere:

- Sementtype (Norcem Anlegg Sement/ Norcem Anlegg FA)
- Flygeaskeinnhold (20-/35-/50 %) av totale bindemiddelmengde
- Silikastøvinnhold (0-/5 %) av klinkermengde
- Herdetemperatur (vannbad 40°C / luft 20°C)
- Herdedøgn (14 og 28 døgn)

Kjennskap til diffusjonskoeffisienten for kloridinntrengning og elektrisk motstand er svært viktig for bestemmelse av levetiden for betong konstruksjoner eksponert mot marint miljø. Levetiden regnes normalt som den tiden det tar fra konstruksjonen er ny til at kloridmengden ved armerningsstålet har nådd kritisk verdi for korrosjon. Kloridinntrengning er målt i henhold til en akselerert prøvingsmetode bygget på NT Build 443. Internprosedyrer av SINTEF beskriver prosedyren for å finne elektrisk motstandsevne og diffusjonskoeffisienten.

Arbeidet er inndelt i to deler: et litteraturstudie og et eksperimentelt program på laboratoriet. Laboratorieresultatene er sammenlignet med forventninger basert på grunnlag av teorien og med resultater i tidligere rapporter som omhandler kloridbestandig betong.

Ut i fra eksperimentene som er utført i denne oppgaven kan det blant annet konkluderes med at flygeaskeeffekten kan først utnyttes etter lange eksponeringstider. Siden pozzolanreaksjonen hemmes av store mengder sementerstatning, utvikler virkning av flygeasken seg langsommere. 35 døgns eksponeringstid er dermed for lite tidsperspektiv til å kunne se fulle utviklingsmønsteret av egenskapene for store mengder sementerstatning av tilsetningsmaterialer. Derfor gir flygeaskeinnblanding noe svakere motstand mot kloridinntrengning i tidlig alder. Silikastøv gir god innvirkning på elektrisk motstandsevne etter 28 dager, men for diffusjonskoeffisienten gir silikastøv noe mer beskjeden innvirkning i kombinasjon med flygeaske. Trykkfastheten er større ved mindre dosering av flygeaske grunnet mindre sementerstatning.

1. Innledning

Kloridinitiert armeringskorrosjon av armerte betongkonstruksjoner i marint miljø er en av de største utfordringene knyttet til bestandighet av betong. Degradering av armeringsstålet forårsaket av kloridinntrengning har vært et forsknings tema med stor oppmerksomhet de siste 50 årene.

Senketunellen i Bjørvika og Parkeringsanlegget på Tjuvholmen i Oslo er noen av de prosjektene hvor tiltak mot armeringskorrosjon har vært spesielt viktig, siden kloridinntrengning i betongen representerte et faremoment for bestandighet til konstruksjonene. I Bjørvikaprojektet ble det i forkant utført en rekke undersøkelser for å finne frem til betong resepter av blandingssement som kunne redusere kloridinntrengning. For Tjuvholmenprosjektet utviklet Vegdirektoratet en 3-pulverblanding (sement, flygeaske og silikastøv) som hadde gode bestandighetsegenskaper. Siden kloridinntrengning kontrolleres av sementsammensetning til en betong, vil større mengder tilsetningsmaterialer som sementerstatning (flygeaske, silikastøv og slagg) redusere kloridinntrengning på grunn av sin tette porestruktur. Formålet med dette er å redusere saltvanninntrengning i betongen og forbedre elektriske motstanden slik at levetiden for konstruksjonen blir betydelig forbedret og korrosjon hindres. [2,4]

Hovedoppgaven er inndelt i to deler: en litteraturstudie og et eksperimentelt program i laboratoriet.

Arbeidet er i hovedsak en del av et videreutviklings arbeid av kloridbestandig betong. Målet er å se nærmere på hvilken innvirkning høydosering av flygeaske har på mekaniske og bestandighets egenskaper i relativt tidlig alder. Ved varierende tilsetning av flygeaske og silikastøv i blandingsene, er formålet å analysere innvirkninger dette har på egenskaper som elektrisk motstandevne og kloridinntrengning (diffusjonskoeffisienten). I diskusjonen og konklusjonen sammenlignes laboratorieresultatene med teorien om kloriddiffusjon i betong og norske erfaringsrapporter.

Betongreseptene for denne oppgaven ble utarbeidet i samarbeid med Magne Maage og Sverre Smeplass fra Skanska Norge AS og prosedyrer fra Sintef ble benyttet for gjennomføring av eksperimentene.

Universitet i Stavanger bistod med laboratoriene, materiell og veiledning av faglærer Kjell Tore Fosså.

2. Bakgrunn, problemstilling og målsetting

2.1 Bakgrunn

På slutten av 1800- tallet ble det observert at klorider kan forårsake korrosjonsnedbrytning i armeringen, noe som skaper store drift og vedlikeholdsproblemer for betongkonstruksjoner i marine miljø. Dette er noe som har ført til at dette fenomenet ble et tema for omfattende forskning både internasjonalt og nasjonalt for å forstå og kontrollere nedbrytningsmekanismene. De siste 50 åra har det blitt publisert en rekke rapporter som tar for seg parametere som diffusjonskoeffisient (D_0) og elektrisk motstandsevne i armertbetong samtidig som forskningsmiljøer investerer ressurser i utviklingsarbeid for å finne frem til de mest bestandige betongreseptene. [3]

Gjennom mange år, da betong i stor grad ble produsert av ordinære Portlandsementer og enkle produksjonsprinsipper, var v/c tall den viktigste parameteren for å fastsette betongkvalitet. Utviklingen i betongteknologi har ført til at utallig forskjellige bindemiddel sammensetninger har kommet inn i betongproduksjonen, og etter hvert har betongens egenskaper også blitt styrt av andre faktorer. Egenskapene kontrolleres også av tilslagsmaterialer, tilsetnings- stoffer/materialer, sementtyper. Selv om v/c-tall fortsatt er den dominerende betongparameteren har det med tiden ført til at den gradvis har mistet mye av "eneretten" for å fastsette betongkvalitet og bestandighetsegenskapene. Dette har resultert i at det etter hvert også har blitt naturlig å klassifisere kvalitet og bestandighet basert på betongens material og funksjonsegenskaper. For eksempel ved kloridholdige miljø er funksjonsegenskaper som diffusjonskoeffisient, kritisk kloridinnhold og elektrisk motstandsevner noen viktige parametere for å finne egnede betongkvaliteter. I dagens prosjekteringsgrunnlag stilles det i tillegg krav til betongkvalitet basert på betongens motstandsevne mot inntrengning av klorider, dvs. betongens diffusjonskoeffisient D_0 . [3]

Diffusjonskoeffisient er en parameter som reflekterer diffusjonshastigheten av klorider i betongen. Med andre ord sikter vi mot lave verdier for diffusjonskoeffisient siden de indikerer langsom kloridinntrengning og dermed en bestandig betong. I tillegg forteller kritisk kloridinnhold C_{crit} oss noe om levetidsvurdering for en konstruksjon. Kritisk kloridinnhold er et mål på kloridmengden som er nødvendig for å sette korrosjonsprosessen. Hvis kloridinnholdet holder seg under den kritiskeverdien, vil ikke armeringen korrodere.[16] Elektrisk motstandsevne er også en viktig materialparameter som forteller noe om korrosjonshastigheten etter at korrosjon er kommet gang. Siden korrosjonsprosesser foregår som resultat av ionevandring i betongen mellom katode og anode på armeringsjernet sikter vi mot å redusere ione transporten i armert betong ved at høye elektriske motstandsverdier er ønskelig. [15]

2.2 Problemstilling

Oppgaven går ut på å studere betong med blandingssement med flygeaske og silikastøv med hensyn på motstand mot kloridinntrenging og elektrisk motstand. Oppgaven omfatter et studium både av nasjonal og internasjonal litteratur på området. Et laboratorieopplegg er planlagt og gjennomført, der blant annet kloridinntrenging og elektrisk motstand på relativt ung betong er undersøkt i tillegg til 28 døgns fasthet. Resultatene er diskutert i forhold til hverandre, teorien og tidligere oppnådde resultater.

Motstand mot kloridinntrengning er undersøkt i henhold til Sintef prosedyre for akselerert kloridinntrengning (NT Build 442) og elektrisk motstand er bestemt ut ifra Sintef prosedyre for elektrisk motstandsevne. 28 døgns fasthet er undersøkt i henhold til standardiserte prosedyrer gitt i Norsk Standard.

2.3 Målsetning, forventning og avgrensning

Hovedformålet bak forsøksprogrammet har vært å bestemme betongens egenskaper med hensyn på diffusjonskoeffisienten (D_o) og elektrisk motstandsevne (ρ) ved tidligalder. Ved å variere på følgende parametere, ønsker vi å se på utslag i D_o og ρ :

- Innvirkning av sementsammensetning
- Innvirkning av flygeaskesement
- Innvirkning av ulike mengder flygeaske
- Innvirkning av silikastøv
- Innvirkning av herdetid henholdsvis 14-døgn og 28-døgn
- Innvirkning av herdeforhold henholdsvis luft ved 20°C og vannbad ved 40°C

I tillegg til diffusjonskoeffisienten og elektrisk motstandsevne, skal vi også dokumentere betongens fasthet etter 28 dagers herding.

Følgende forventninger, til resultater basert på tidligere erfaringsrapporter og teori, kan settes opp [10,13,15,18]:

- Flygeaske har lang reaksjonstid
- Høye flygeaskedoser vil retardere egenskapsutvikling (D_o og ρ) i tidligalder.
- Lavere trykkfasthet desto mer flygeaske innhold.
- Silikastøv kort reaksjonstid
- God kloridmotstand ved silikatilsetning i tidligalder
- Økt elektrisk motstand i betongen ved silikastøv tilsetning.
- Høyere herdetemperatur vil gi lavere diffusjonskoeffisienter

Basert på tidligere forsøk, kan det forventes at mange av egenskapene ikke får utviklet seg til et stabilt nivå, siden flygeaskebetong trenger lengre tid for å utvikle sine egenskaper fullstendig. Erfaringen viser gjerne 2-4 år før den har utviklet sin fulle effekt [13,18].

Sementtypene som ble brukt i forsøket var, Norcem Anlegg og Norcem Anlegg FA. Det begrunnes med at disse sementene har saktere varmeutvikling og høyere slutfasthet sammenlignet med de andre sementene fra Norcem. Langsom varmeutvikling fører til at egenskapene utvikler seg over lengere tidsrom.

I alle blandinger ble matriksmengden holdt konstant på ca 320 l/m³ og størrelsesorden på tilslag som ble brukt var 0-5, 5-8 og 8-16 mm. Superplastiserende stoffer ble benyttet for å gi blandingen ønsket konsistens med tilsiktet synkmål på 220mm ± 20mm.

Resultatene kan vurderes i forhold til erfaringstall fra tidligere utførte analyser, eller relateres til en referansebetong som er en del av den aktuelle prøveserie. Laboratorieforsøket omfatter blant annet bruk av NT Build 443 metoden for å komme frem til kloridmotstanden i betong

Kloridinitiert armering er et stort og bredt tema innen betongteknologi. Derfor er avgrensning av oppgaven viktig for å kunne dekke problemstillingen effektivt og innen tidsrammen som er satt. Det er en del teori som er nødvendig å ha kjennskap til som bakgrunnsstoff for å få en bredere innsikt i problemstillingen. På grunn av avgrensningen så vil ikke kritisk kloridinnhold og valg av overdekning bli behandlet i detalj.

Kritisk kloridinnhold forteller om kloridinnholdet som trengs for initiering av korrosjon av armeringsjernet. Dette kalles ofte terskelverdien eller kritisk kloridinnhold. Kritiske kloridinnhold kan variere avhengig av sementtype, v/c-tall, pH i porevannet, fukt i betong, stål/betong grenseflate, stål potensialet [16].

Betongoverdekning av armeringen er en viktig faktor for initieringsperioden. En halvering av overdekning vil redusere initieringsperioden til en fjerdedel. NS-EN 1992-1-1 gir krav til overdekning av miljøpåkjenning.

2.4 Eksempler

2.4.1 Bjørvikaprojektet

Bjørvikatunellen binder sammen Festningstunellen og Ekebergstunellen som en del av fremtidige E18 i Oslo. Tunellen er 1100 m lang og består av 6 kulvertelementer som ble senket og koblet sammen sekvensielt som vist i figur 2.1.

Erfaringer med Bjørvika senketunellen krevde spesiell kompetanse innen betongteknologi og utførelse på grunn av utfordringene. [21]

- Senketunellen ville bli utsatt for vanntrykk 24 timer i døgnet. Det var derfor viktig med en vanntett og rissfri betong med lav permeabilitet som var motstandsdyktig mot kloridinntrengning.
- Vedlikehold og reparasjon under vann er svært vanskelig og kostbart. Derfor var løsninger som ikke krevde utbedring i bruksperioden optimale.
- Bestandighet mot alle nedbrytningsmekanismer samt levetidsprosjektering over 100år



Figur 2. 1 Bjørviksenketunell [24]

”I forbindelse med ”Bjørvikprosjektet” undersøkte Vegdirektoratet, Materialteknisk avdeling, en rekke betongsammensetninger. Prosjektet omfattet laboratorieforsøk, feltforsøk, temperatur- og spenningsberegninger. Betonger med ”3-pulverblanding” utgjorde en sentral del av undersøkelsene, dvs. bindemiddel bestående av sement, silikastøv og enten flyveaske (FA) eller slagg (opptil 50 % erstatning av sementen). Slike betonger, som gjerne kalles ”lavvarmebetong”, har hittil i liten grad vært benyttet i Norge, men er utbredt i flere andre land (f.eks. Nederland, Tyskland, Japan).” [4]

Utviklingsarbeidet av betongen tok utgangspunkt i trepulverblanding bestående av: [21]

- Norcem Anleggssement
- Flyveaske andel 30-65 % av klinkermengde
- Silikastøv andel 4-8 %
- Masseforhold $m \leq 0,45$

AF Bjørvikatunnelen og NorBetong stod bak reseptutviklingen for betongen brukt ved Bjørvikprosjektet. All betong i senketunnelen ble produsert med et flyveaskeinnehald på 44-50% og masseforhold på 0,38-0,39 i henhold til krav som ble stilt for betongen. [21]

På Bjørvikaprojektet ble det valgt å bruke en sement med flygeasketilsetning på ca 45 % fordi sementmøllene hos Norcem ikke hadde kapasitet til å sam-male en større doseringsandel flygeaske.

”Hovedårsaken for sam-malingen er å forenkle logistikk, men sam-malingen gjør det også mulig å få en grovere blaine finhet på Sementen slik at en lavere varmeutvikling kan oppnås”. [5]. Flygeaskeinnblanding gjør også betongen mer bestandig mot kloridinntrengning.

Noen resultater fra Bjørvika reseptutviklingsarbeid for elektriskmotstandevne er ført i tabell 3.2 og tabell 3.3.

2.4.2 Tjuvholmenprosjektet

Skanska Norge AS har bygd ut parkeringsanlegget ved Tjuvholmen i Oslo som er Nordens første undervannsparkeringshus. Enorme betongkonstruksjonen med dimensjon 155mx24mx14m ble støpt i tørrdokk i Fredrikstad og fraktet til Oslo, hvor ”kassene” ble senket ned i vannet. På oversiden bygges det leiligheter, kontorer og næringsarealer, som gir området ett nytt arkitektonisk preg som vist i figur 2.2 og 2.3.



Figur 2. 2 Tjuvholmen [2]

Siden Tjuvholmen stod ovenfor noen av de samme utfordringene som Bjørvika ble prosjektering av parkeringsanlegget bygd på erfaringer Skanska Norge AS fikk med Bjørvika prosjektet og andre tidligere erfaringer med betongkonstruksjoner i marint miljø. En rekke

undersøkelser ble utført i forkant for å utvikle betongresepter for å møte disse utfordringene. Løsningen var blandingssement med silikastøv og flygeaske som ga en tett betongstruktur. Reduserte varmeutviklingen i betongen gjør at betongen også kan kalles lavvarmebetong.

Blandingssementene gav både lavere varmeutvikling, lavere diffusjonskoeffisienter og høyere elektrisk motstand.

”I utgangspunktet var det viktig å få spesifisert en kombinasjon av betongkvalitet og betongoverdekning som ville gi en så lav sannsynlighet for armeringskorrosjon som mulig etter en bruksperiode på 150 år” [2]. For bestandighetsanalyser for blandingssementene ble det i utgangspunktet valgt en kloriddiffusivitet på $2,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ og en nominell betongoverdekning på $100 \pm 10 \text{ mm}$. Som resultat av analysen var sannsynligheten for armeringskorrosjon i de mest utsatte deler av konstruksjonen målt mindre enn 0,3 % etter en bruksperiode på 150 år [2]. Resultater fra bestandighetsanalyser i kombinasjon med større betongoverdekning ble krav for 300 års levetid oppnådd for Tjuvholmen.



Figur 2. 3 Parkeringsanlegg ved Tjuvholmen [2]

2.5 Varmeutvikling og Lavvarmebetong

Betong endrer sitt volum ved temperaturvariasjoner. Dette skjer ved at betongen utvikler varme i herdefasen, og ved ytre temperatur påkjenninger forårsaket av vær og klima.

Indre temperaturforandringer skjer ved hydrasjonsprosessen mellom sement og vann, som er en eksoterm reaksjon. Det gjør at betongen utvikler varme, med temperaturstigning opptil 30-40 °C de første dagene etter utstøping. Deretter følger det en avkjølingsfase hvor temperaturen går ned og betongen får en temperaturlikevekt med omgivelsene. Vanlig

Portlands sement utvikler 400-500 °C/ kg ved full hydratisering. Ved masseforhold lik 0,40 og herding ved 20°C vil Norcem anleggsement utvikle varme på 310 kJ/ pr kg sement. Industri sement vil under samme forhold utvikle varme på 330 kJ/kg pr sement [20].

Ved å erstatte sement med flygeaske vil man redusere eksoterme reaksjoner mellom sement og vann som skaper varmeutvikling. På grunn av tregere pozzolan reaksjoner forårsaket av utskifting av portlandsement med flygeaske resulterer i retardering og fordeling av varme utvikling over en lengre periode. Dermed får vi lavere temperaturer for høy flygeaske betong, som har anslått til å redusere varmeutvikling med 15-30% sammenlignet med ordinær Portland sement.[10]

Varmeutviklingen i betong spiller en sentral rolle i egenskapsutvikling ved betongen. Med lavvarme betong vil mekaniske og bestandighets egenskapene utvikle seg tregere enn under normale forhold.

Disse temperaturvariasjonene forårsaker volumendringer i betongen. Betongen utvider seg ved økende temperatur og trekker seg sammen ved fallende temperatur. Hvis betongen er fastholdt, vil vi kunne få spenningsoppbygging i betongen. Når denne spenningsoppbyggingen resulterer i større strekkspenninger enn strekkkapasiteten, vil vi få rissdannelser. [20]

Bruk av lavvarmebetong er gunstigere med tanke på lite rissutvikling. Reaksjonen mellom vann og sement går tregere og total varmeutvikling er mindre slik at temperatur variasjonen ikke blir så stor. Lavvarmebetong er betong som bruker tilsetningsmaterialer som erstatning for sement slik at vi får mindre varmeutvikling. Konstruksjonen opplever smidigere temperaturvariasjoner slik at vi sammen med riktige herdetiltak reduserer faren for riss betydelig. Riss i betong konstruksjoner er svært ugunstig med tanke på både tetthet og bestandigheten. Opprissing forårsaket av fastholdte volumendringer i herdefasen vil kunne gi funksjonsproblemer i form av lekkasjer, og potensielle bestandighetsproblemer knyttet til kloridinntrengning. Riss vil forårsake lavere elektrisk- og kloridinntrengningsmotstandsevne.

2.6 Høy flygeaske betong og permabilitet

Høy dosering flygeaske betong

High volume flyash (HVFA) er en engelsk betegnelse på betong med høy dosering av flygeaske. Det er et begrep som introdusert i 1985 av Malhotra. I siste tiårene har blant annet bestandighetsforhold på grunn av miljøeksponering ført til at store mengde flygeaske har blitt brukt som sementerstatning enn det som normalt har vært brukt. I noen tilfeller har 50 -60 % flygeaske erstattet sementmengden. [7]

HVFA har god støplighets egenskaper, inneholder som regel lav mengde med vanninnhold, lav varmeutvikling, moderat innvirkning på bestandighets og mekaniske egenskapene tidligfasen, men gode egenskaper ved senere alder. Det viktig med tilstrekkelig herdeforhold for å utnyttet

flygeasken effekt best mulig. Hvis det ikke er mulig er det anbefalt å redusere mengden flygeaske.

Betong med høydosering flygeaske har varierte bruksområder, hvor betong til massivekonstruksjoner, offshore betong og betong brukt ved marine konstruksjoner er noen av dem.

Permabilitet

Permeabilitet er en viktig aspekt ved betong bestandighet, hvor lav permabilitet representerer tett betong med lite væske inntrengning. Permeabilitet til en betong er styrt av mange faktorer som for eksempel sementttype, tilslags gradering, v/c-tall, tilsetningsmaterialer, herding etc.

Pozzolanreaksjonen forårsaket av flygeaske reagerer med kalsiumhydroksid og danner faste forbindelser. Disse forbindelsene kan sammenlignes med produkt fra sementvannreaksjon, C-S-H gel. Innvirkning av flygeaske vil resultere i videre fordeling i finere porer. Denne fine porestrukturen gir lavere permabilitet i betongen. Dette fører til forbedret bestandighet som gjør væskeinntrengning i betongen vanskeligere. Derfor er flygeaske i betong en gunstig delmateriale for å redusere permeabiliteten. [7]

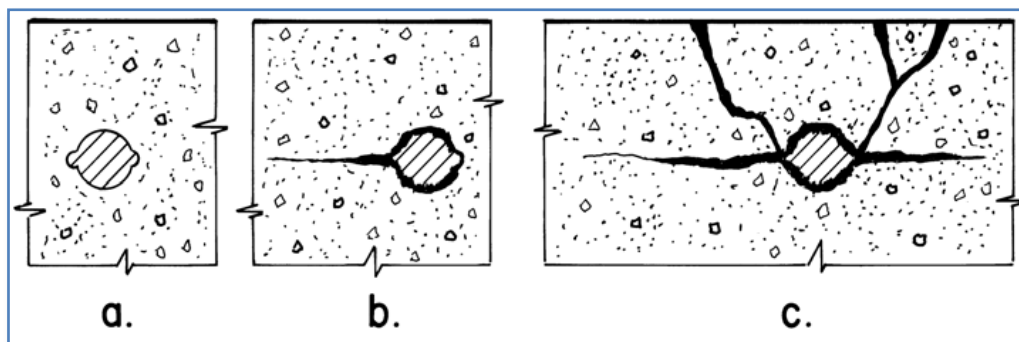
Silikastøv har også tilsvarende effekt. Forskjellen mellom silikastøv og flygeaske ligger i reaksjonstiden. Mens silikastøv har rask reaksjons tid på noen uker, er flygeaskereaksjon mye langsommere og kan ta noen måneder/år før den har blitt utnyttet fullt og effekten synlig gjennom resultater.

3. Nedbrytningsmekanismer – Armeringskorrosjon

3.1 Generelt

Betong i likhet med andre materialer, opplever nedbrytning med tiden. Hastigheten er avhengig av den typen påkjenning betongen er utsatt for. Nedbrytning av betongkonstruksjoner skjer enten ved mekanisk eller kjemisk påkjenning, eller en kombinasjon av begge. Den mest vanligste nedbrytningsmekanismen er armeringskorrosjon. Den kan ha mange årsaker hvor kloridinntrengning er blant de vanligste årsakene.

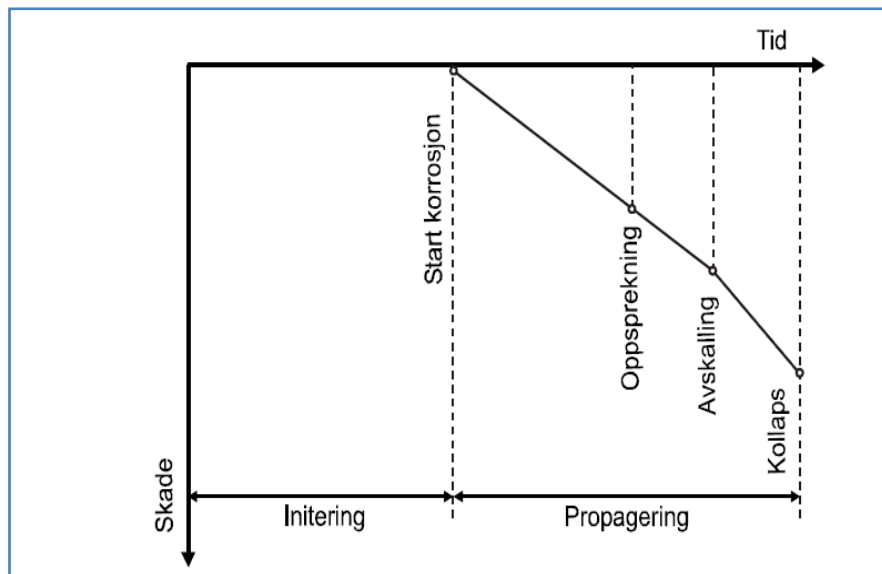
Armeringskorrosjon er årsak til mange store skader i betongkonstruksjoner. Armeringskorrosjon forårsaker rustfarging, sprekkdannelser, avskalling av overdekning og svekkelse på konstruksjonen. Dette er illustrert prinsipielt på figur 3.1.[1]



Figur 3. 1 Armering i passiv tilstand, b) oppsprekking c) avskalling av betong [25]

Armeringen beskyttes av en tynn oksidfilm som under normale forhold. Filmen fungerer som en beskyttelse mot korrosjon. Det er betongens høye alkalitet ($14 > \text{pH} > 12,5$) i porestrukturen som danner det beskyttende laget rundt armeringsstålet (passivering). Denne passiviseringen/ -oksidfilmen kan brytes ned ved kloridinntrengning i betongen, som kan medføre i armeringskorrosjon når forholdene ellers ligger til rette for det. For en betongkonstruksjon i kloridholdigemiljø, vil det i prinsippet foregå en nedbytning i form av armeringskorrosjon. Etter at kloridene har penetrert inn til overflaten på armeringsjernet, vil korrosjonsprosess settes i gang, men det vil ta enda 3-5 år før synelige skader oppstår, og enda lenger tid før bæreevnen til konstruksjonen blir alvorlig svekket. [1]

Prosessen frem til korrosjon kan deles inn i to faser, initieringsperioden og korrosjons/propagering perioden. På initieringsfasen er kloridinnholdet ved armeringen høyt nok til at armeringen kan starte å korrodere. Korrosjonsperiode er når skadeutviklingen starter på grunn av korrosjon. Denne perioden kalles propageringsfasen eller utviklingsfasen. Dette er illustrert i figur 3.2.



Figur 3. 2 Nedbrytningsprosessen frem til kollaps [25]

Rustproduktene har større volum enn armeringsstålet og vil gi en sprengvirkning på betongen slik at det oppstår rissdannelser, avskalling og, tap av bæreevne på grunn av redusert armeringstverrsnitt.

Det eksisterer en simpel diffusjonsmodell som gjør en i stand til å bestemme tidsforløpet for kloridinntrengning inn til armeringsjernet. Fullstendige matematiske modeller er fortsatt ikke utviklet for beregning av korrosjonsforløpet. [3]

3.2 Kloridinntrengning

Klorider kan være i byggematerialene fra starten av, eller trenge inn i betongen gjennom brukstiden. Klorider som blir tilført gjennom produksjon, kommer av at materialer som kloridholdige akselerator, saltvann eller kloridforurensset tilslag har blitt benyttet. Sement kan også inneholde mindre mengder klorider. Når disse delmaterialene blandes sammen, vil stor del av kloridene binde seg kjemisk sammen og fordele seg i betongen, mens resterende kloridandelen vil opptre som kloridioner i porevannet. Det er disse frie kloridionene som kan forårsaker armeringskorrosjon.[1]

Kloridinntrengning gjennom brukstiden forårsakes av eksponering mot aggressivt miljø, hvor klorider kan penetrere inn i betongen gjennom diffusjon eller ved transport av kloridholdig vann. Dette kan føre til armeringskorrosjon med tiden. På tilsvarende måte vil også en andel av kloridene binde seg kjemisk og resterende som frie ioner i porevannet. Tilgang på vann, oksygen og tilstrekkelig mengde klorider på ståloverflaten er nødvendig for å sette i gang korrosjon. Nedbrytning av oksidfilmen på armeringen er en tidsavhengig prosess som er avhengig av følgende parametre [1]

- Diffusjonshastigheten av kloridene (bestemmes av masseforhold, innhold av silikastøv og flygeaske, etterbehandling etc.)
- Binding av klorider i betongen (sementtype, C_3A - innhold)
- Kritisk kloridnivå
- Overdekning (kvalitet og tykkelse) [1]

Kritisk kloridmengde er ikke fast definert slik at alle konstruksjoner må vurderes for seg selv. Kritisk kloridmengden kan variere fra 0,1 % til 2 % klorider av sementinnhold. Dette skyldes påvirkning fra fuktinnhold, elektrisk motstand, sementtype og temperatur. [1]

Diffusjonskoeffisient D_0 og kritisk kloridinnhold C_{crit} er viktige parametere for å bestemme livsløp til en betongkonstruksjon. Diffusjonskoeffisienten gjenspeiler betongens motstandsevne mot kloridinntrengning mens kritisk kloridinnhold forteller noe om kloridnivået ved armeringen som kreves for å sette i gang korrosjon.

3.2.1 Kloriddiffusivitet, D_0

Diffusjonskoeffisient (D_0) for betong er en viktig materialparameter som angir betongens motstandsevne mot kloridinntrengning i kloridholdige miljø. Erfaring viser at betong med masseforhold på 0,4 eller lavere gir en stor motstandsevne mot kloridinntrengning, noe som gir lave verdier for diffusjonskoeffisienten D_0 . I tillegg til v/c tall, viser forskning at andre forhold som valg av sementtype og tilsetningsmaterialer i betongblandingen er også viktig for å oppnå høy motstandsevne mot kloridinntrengninger. Hvis betongens masseforhold reduseres fra 0,45 til 0,35 for ren portlandsement, vil den i liten grad påvirke diffusjonskoeffisienten sammenlignet med sement erstatning av flygeaske og silikastøv som vil redusere kloriddiffusiviteten. Derfor kan betongens kloriddiffusivitet være forskjellig for forskjellige typer betong hvor alle oppfyller det samme krav til betongens masseforhold. [3]

Det finnes flere standardiserte prøvings metoder som alle er akselererte prøvings metoder. I prinsipp vil disse metodene gi forskjellige kloridinntrengning i betongen enn det en får under naturlige forhold ute på felt. NT Build 443 er en metode som er mye anvendt for en hurtig og enkel kvalitetskontroll for bestemmelse av kloridinntrengning. Dette er en sterkt akselerert prøvingsmetode som er stand til å differensiere forskjellige motstandsevner mot kloridinntrengning i de mest tette betongkvalitetene. Diffusjonskoeffisient kan være forskjellig avhengig av type betong selv om de oppfyller samme krav til betongens masseforhold. [3]

I prosjekteringsgrunnlag stilles det kombinerte krav til betongkvaliteten basert på betongens motstandsevne mot kloridinntrengning og krav til overdekning. Etterfølgende tabell gir oss en skala på hvilke verdier som er betraktet som motstandsdyktige. [3]

Tabell 3. 1 Sammenheng mellom Diffusjonskoeffisient og kloridmotstandsevne [23]

Kloriddiffusivitet, D_{28} $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Motstandsevne mot kloridinntrengning
>15	Lav
10 – 15	Moderat
5 – 10	Høy
2.5 – 5	Svært høy
< 2.5	Særdeles høy

3.2.2 Innvirkning av silikastøv

Høy konsentrasjon frie ioner i porevannet er ugunstig med tanke på armeringskorrosjon. Ved tilsetning av silikastøv i sement og/eller betong vil inntrengning av klorider gå mer langsomt enn i betong med ren Portland sement. Silikastøv gir betongen en mer finfordelt porestruktur, noe som fører til at motstanden mot væskeinntrengningen blir bedre. Silikastøv tilsetninger vil minke permeabiliteten til betongen.

Som nevnt vil silikastøv fører til at vi får en finere porestruktur i betongen, siden porene delvis blir erstattet med reaksjonsprodukter, C-H-S gel. Dette fører til at vi får en mer homogen og tettere betong. Konsekvensen av dette er at vi reduserer klorideinntrengning i betong. Permeabiliteten reduseres ved finere porestruktur i betongen, slik at vi får en bestandig betong. NS-EN 206-1 forutsetter bruk av minimum 4% silikastøv i bestandighetsklassene M40 og MF40 når det brukes CEM I sementer for å oppnå ønsket tetthet ved bruk av betong i aggressive miljø. Silikastøvinnhold vil dermed gi lave diffusjonskoeffisienter. [1]

Tidligere erfaringen viser også at silikastøv forbedrer kloridinntrengningsmotstanden i betongen vesentlig, noe som resulterer i lave diffusjonskoeffisienter. Ved bruk av betong i aggressive miljø bør det alltid brukes silikastøv. [13]

3.2.3 Innvirkning av flygeaske

Effekten av flygeaske på betong egenskaper kan sammenlignes med effekten av silikastøv betong siden reaksjonsprosessen med sementen er lik. Man kan ofte bruke silikastøv effekten som en referanse til å forstå flygeaske effekten på betongen. Forskjellen ligger blant annet i flygeasken har langsommere reaksjonstid enn silikastøv.

Vannsement reaksjonen produserer kalsiumhydroksid som legger seg som et svakt sjikt rundt armeringsjernet, tilslagskornene og i tillegg blir det oppløst i porevannet. Ved bruk av silikastøv og flygeaske vil disse sjiktene og kapillærporene delvis blir erstattet med reaksjonsprodukter (C-S-H-produkter), noe som gjør at vi får en mer kompakt betong ved at

det totale porevolumet avtar. Dette gir utslag som tett betong med bedre kloridinntrengningsmotstand ved bruk av silikastøv. [1]

Innvirkningen av flygeaske kan sammenlignes med innvirkning av silikastøv. Lavere C_{crit} og D_o verdier kan bli observert ved økende mengde flygeasketilsetning opptil fire år etter eksponering i saltvann. Kloridmengder i sement blir betydelig redusert ved flygeasketilsetning sammenlignet med ordinær Portland sement. Flygeaske bidrar til å øke kapasiteten for binding av klorider for bindemiddelet. Flygeaske har lik effekt som silikastøv, ved at den gir betongen en mer tettere porestruktur. Dette gjør at vi får lavere ionekonsentrasjon i porevannet slik at vi får lave diffusjonskoeffisienter [10,15]. Flygeaske har en mer langsom reaksjonstid sammenlignet med silikastøv som har relativt kort reaksjonstid.

Tidligere erfaringen viser også at flygeaske forbedrer kloridinntrengningsmotstanden i betongen merkbart først etter 1-2 år etter støp. [13]. Flygeaskens langtidsvirkning resulterer i fortettet betongstruktur og resulterer dermed i lavere diffusjonskoeffisienter.

3.2.4 Innvirkning av høyere herde temperatur og v/c

Høye herdetemperatur får reaksjonen til å gå raskere noe som fører til at alle egenskaper inkludert diffusjonskoeffisient utvikler seg raskere. Lave v/c tall gir en tettere porestruktur som forbedrer permeabiliteten til betongen, noe som gir gevinst i form av lave diffusjonskoeffisienter. Tilstedeværelse av fukt og temperatur over +5 °C er nærmest en forutsetning for at en pozzolanreaksjon skal finne sted. Pozzolanreaksjon er generelt mer temperatursensitiv enn sementtyderatisering, lave temperatur vil resultere saktere egenskaps utvikling, mens høye temperaturforhold vil akselerere utviklingen sterkt. Høye temperaturer vil akselerere innvirkning av silikastøv og flygeaske, noe som er gunstig for kloridinntrengning. [10]

Som sagt ved normale/lave temperaturer, vil pozzolanreaksjon foregå saktere, noe som gjør at herdetiltak er vesentlige etter utstøp slik at vi unngår varmetap og kan få full utbytte av innvirkning av tilsetningsmaterialet.

Det finnes mange årsaker til at vi ikke får en tett betong, for sementpastaen spiller v/c tall en sentral rolle. Ved høye v/c-tall vil vi få en åpen betong med kapillærporer, noe som gjør at motstand mot inntrengning minker. Dette kan reduseres ved å bruke lavere v/c-tall, for eksempel ved bruk av v/c=0,4 vil vi få så små porer i sementpastaen slik at vann gjennomtrengning blir betydelig redusert eller eliminert. NS-EN 206-1 stiller krav om at v/c-tallet for vanntettbetong skal være lavere enn 0,5 [1]. Høye v/c-tall vil resultere i store diffusjonskoeffisienter og lave elektrisk motstandsverdier.

3.3 Elektrisk motstandsevne

Den elektriske motstandsevnen i betong er en av parametrene som er avgjørende for hvor rask korrosjonen vil utvikle seg etter at forholdene ellers er lagt til rette for at korrosjon skal foregå. Elektrisk motstandsevne er en egenskap som forteller noe om tetthets og bestandighetsegenskapene til betongen. Denne parameteren er tilknyttet til porevannet i betongen og betongtetthet. [15]

Porevann er en ionisk løsning (elektrolytt) som inneholder som regel K^+ , Na^+ , Ca^{++} , SO_4^- og OH^- ioner i tillegg kan porevannet også inneholde klorider fra saltvann eller andre kilder. Dette fører til at ionekonsentrasjonen øker, noe som resulterer i reduksjon i den elektriske motstandsevnen. Betong med tilsetningsmaterialer har mindre porestruktur, det resulterer i mindre ionekonsentrasjonen sammenliknet med vanlig portlandssement, dermed får vi høyere elektrisk motstandsverdier. Andre faktorer som riss og metningsgraden har også stor innflytelse på motstandsevnen. Elektriske motstandsevnen er påvirket av mange parametere. Derfor brukes også elektriske motstandsevnen til å indikere tetthet av betongen, og dermed kloridinntrengningsmotstand.[15]

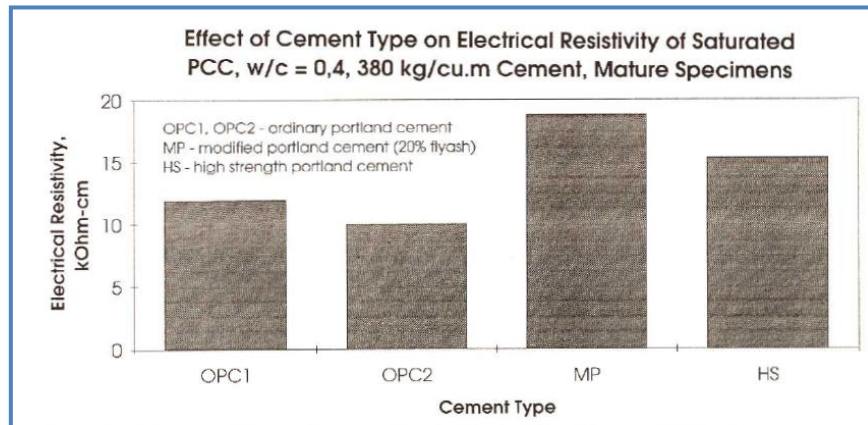
Det er gjennomført mange studier for å finne verdien av motstanden som kreves for å forhindre korrosjon. Forskingen bekrefter at motstandsverdier på 500 Ω m eller lavere, kan sette i gang korrosjon om forholdene rundt også ligger til rette for det, mens verdien på motstand som er akseptable er ikke helt definert. Flere studier bekrefter at motstandsevne over 1000 Ω m vil gi god beskyttelse mot korrosjon, selv om det finnes også en studie som mener at verdi på 600 Ω m er tilstrekkelig. [15]

I vannmettet betong er elektriskstrøm hovedsakelig ledet gjennom av ioner i porevannet. Fra dette kan man videre anta at det er to faktorer som påvirker elektrisk motstandsevnen, porestrukturen og total ionekonsentrasjonen i porevannet. Vi kan påvirke porestrukturer med ulike betongsammensetninger. Vi skal se nærmere på hvilken effekt delmaterialene har på elektrisk motstandsevne.[15]

3.3.1 Innvirkning av sement type

Sementtype har både effekt på porestrukturen og på porevannskjemien. Figur 3.3 viser sammenheng mellom fire ulike sementtyper og elektrisk motstandsevne til betongen. OPC1 og OPC2 er ordinære Portland sementer, MP er Portlandsement med 20% flygeaske og HS er høyfasthetssement [15]. Vi kan merke oss at i betong med flygeaskesement, øker den elektriske motstanden betydelig sammenliknet med betong med de andre sementtypene, betinget at de er herdet ferdig. Betong med ordinær Portlandsement har mye lavere motstandsverdier, det skyldes at betongen ikke har finfordelt porestruktur og ionekonsentrasjonen er høyere sammenliknet med flygeaskebetong. Hadde vi hatt en tidslinje i tillegg, kunne vi ha observert at ordinær betongen har mye raskere egenskapsutvikling sammenliknet med flygeaskebetongen. Dette skyldes at de hydrauliske reaksjonene mellom sement og vann skaper varmeutvikling og noe som videre gir gevinst i form av raskere

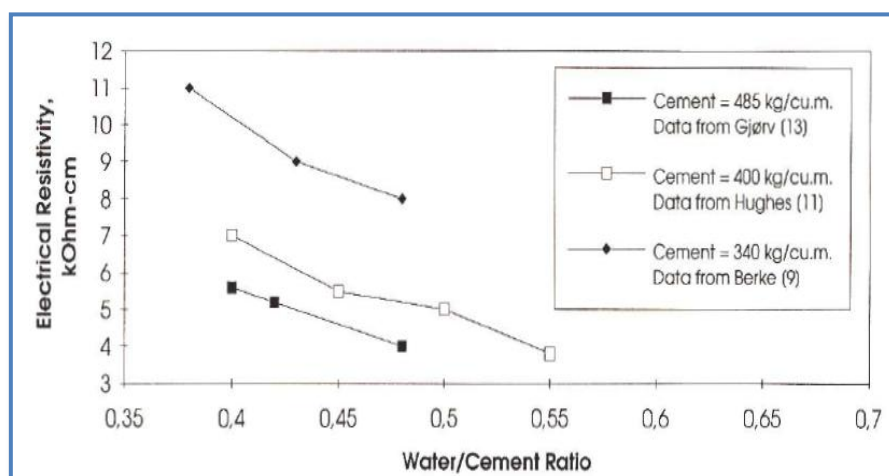
utvikling av elektrisk motstandsevne. Mens i flygeaskebetong har en del av sementen blitt erstattet av flygeaske, noe som hemmer reaksjonen forårsaket av mindre varmeutviklingen i ung alder, noe som naturlig vis resulterer i tregere utvikling av motstandsevnen. Ved herdet betong vil innvirkning av flygeaske gi betydelig bedre resultater for bestandighet enn for ordinær betong.



Figur 3. 3 Innvirkning av sementtype på elektriskledningsevne [15]

3.3.2 Innvirkning av v/c -forholdet

Masseforholdet har en stor innvirkning på betongens porestruktur for herdet betong. Høyere v/c-tall gir mer porer og grovere porestruktur, noe som genererer ionetransport i porevannet slik at motstanden avtar. Tilsvarende vil lavere v/c-tall gi lavere poreinnhold og tettere porestruktur, som igjen gir mindre ionetransport og dermed høyere elektrisk motstand. Figur 3.4 viser sammenheng mellom v/c forhold og elektronisk ledningsevne [15].



Figur 3. 4 Innvirkning av v/c tall på elektrisk motstandsevne [15]

3.3.3 Innvirkning av herdetemperatur

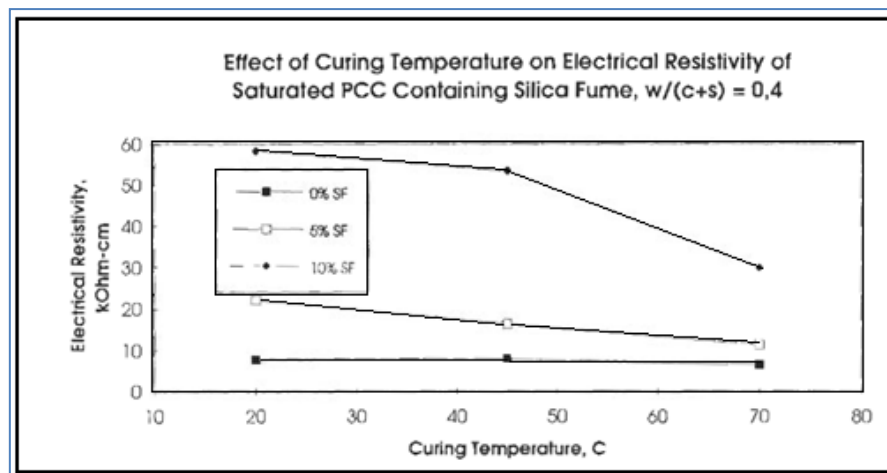
Figur 3.5 viser innvirkning av herdetemperatur på elektrisk motstandsevne på betong som inneholder 0, 5 og 10 % silikastøv. Masseforhold holdes konstant på 0,4 [15]. Figuren viser at

ved høye herdetemperaturer, vil elektriskmotstand minke. Denne effekten blir mer tydelig ved høye dosering av silikastøv. Herding ved 20 °C herding med silikastøv tilsatt, vil vi oppnå gode resultater på elektrisk motstand for betongen. Fra prosjektet ”materialutvikling kloridbestandig betong” vet vi også at elektriskmotstand avtar med økende temperatur: [18]

Ca 5% pr °C i området 5-20 °C

Ca 3% pr °C i området 20-35 °C

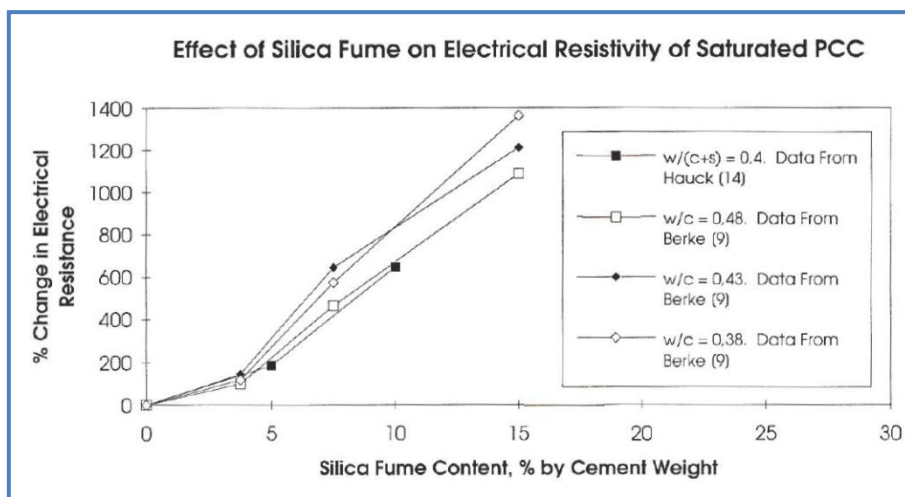
Ved høye herdetemperaturer virker det som vi får en mer porøs betong og ionevandringen i porevannet øker slik at motstandsverdier synker.



Figur 3. 5 Innvirkning av herde temperatur på elektrisk motstandsevne [15]

3.3.4 Innvirkning av Flygeaske og silikastøv

Bruk av tilsetningsmaterialer som flygeaske og silikastøv, vil gi en mer tettpakket porestruktur. Dette resulterer til mindre ione konsentrasjon i porevannet, noe som resulterer i høyere elektrisk motstandsevne i betongen. Hvis innvirkningen av flygeaske og silikastøv blir satt inn i et tabell med tidsforløp, kan man merke at silikastøv gir en hurtigere utvikling av elektriske motstandsevnen sammenlignet med betong med flygeaske. Figur 3.6 viser sammenheng mellom innhold av silikastøv innhold og elektrisk motstands evne. [15]



Figur 3. 6 Innvirkning av Silikastøv på elektriskmotstand [15]

Tabell 3. 2 Effekt av silikastøv på elektriskmotstand [18]

Resept nr.	Beskrivelse	Si %	Alder, døgn						
			1	3	7	28	90	252	Ca 3 år
1	SV-50	0	18,8	34,4	42,6	61,2	81,9	84,7	97,7
6	Ref.-0,45	5	17,1	31,8	43,7	160,9	252,2	234,9	202,9
11	40 % fa-0s	0	12,6	29,7	37,5	83,5	235,7	396,0	631,2
8	40 % fa	5	14,8	28,3	36,7	164,8	398,4	527,2	752,3
23	60 % f.sl-0s	0	16,4	30,2	44,1	110,1	196,8	256,0	337,6
21	60 % f. sl	5	14,4	27,0	36,7	168,8	422,1	453,3	540,9
24	60 % f. sl-10s	10	13,3	25,2	38,3	286,7	555,8	517,7	595,8

Tabell 3.2 er fra erfaringsrapporten fra Bjørvika senketunell viser at bruken av silikastøv øker den elektriske motstandsevnen etter 28 døgn og senere. Innvirkning av silikastøv på motstandsverdiene viser en trend som går igjen uavhengig ved bruk av ren Portlandsement, betong med slagg eller betong med flygeaske er benyttet.

Tabell 3. 3 Effekt av flygeaske på elektriskmotstand [18]

Resept nr.	Beskrivelse	Alder, døgn						
		1	3	7	28	90	252	Ca 3 år
6	Ref.-0,45	17,1	31,8	43,7	160,9	252,2	234,9	202,9
8	40 % fa	14,8	28,3	36,7	164,8	398,4	527,2	752,3
9a	60 % fa-A	16,0	30,7	37,2	164,9	383,3	(412,3)	1037,0
9b	60 % fa-B	12,0	26,8	32,3	149,8	353,7	611,7	1006,8
10	75 % fa	11,4	23,2	31,3	134,2	351,3	693,4	1374,0
17	100 % fa	11,1	22,4	30,7	132,7	427,9	1069,8	2820,2

Tabell 3.3 viser at flygeaske bidrar til å øke den elektriske motstanden først etter 90døgn, men det er ikke før 252 døgn at vi ser en klar sammenheng mellom økende dosering av flygeaske og elektrisk motstandsevne. Etter 3år oppnår man betydelig utvikling av motstandsverdiene og effekten av økende flygeaskemengde er kraftig.

4. Bakgrunn for eksperimenteltarbeid

4.1 Generelt

Forsøksprogrammet ble utarbeidet i samarbeid med Magne Maage og Sverre Smeplass i Skanska Norge AS.

Hovedmålsettingen med forsøksprogrammet var å undersøke og dokumentere.

- Innvirkning av økende flygeaskemengde (20, 35, 50 %) på trykkfasthet, elektrisk motstand og kloridinntrengning i betong
- Innvirkning av 0 og 5 % silikastøv på trykkfasthet, elektrisk motstand og kloridinntrengning
- Innvirkning av anlegg FA-sement og anlegg-sement på trykkfasthet, elektrisk motstand og kloridinntrengning
- Innvirkning av herdeforhold som (1) tettpakket i plast i 20 °C i luft, kontra (2) 40 °C innpakket i plast like etter utstøping og plassert i vannbad fram til-, 2 døgn etter utstøping så over i luft ved 20 °C.
- Innvirkning av herdetid, henholdsvis etter 14 døgn og 28 døgn, på trykkfasthet, elektrisk motstand og kloridinntrengning.

4.2 Delmaterialer

Følgende delmaterialer blir brukt i betongblandningene:

4.2.1 Anleggsement

Norcem Anleggsement er en sementtype som ble utgangspunkt utviklet for bygging av betongplattformer i Nordsjøen. Sementen gir en langsom utvikling og lav sluttverdi av varmeutvikling. Dermed gir anlegg sementen lav tidligfasthet, mens en høyere sluttfasthet. Sementen har også gode støplighets egenskaper og bestandighetsegenskaper. Mekaniske egenskaper som kloridinntrengnings motstanden er stor og på grunn av lave alkali innhold gjør anleggsement godt egnet sammen med alkalieaktiv tilslag. Sementen brukes Brukonstruksjoner, slitedekker på veier og lignende. Tabell 4.1 angir produktinformasjon for Norcem Anleggsement.

- Godt tilpasset for bruk i konstruksjoner med krav til god bestandighet og høy sluttfasthet.
- Langsom varmeutvikling
- Redusert alkalieinnhold
- Meget gode støplighets og bestandighets egenskaper.

Tabell 4. 1 Norcem Anlegg produktinformasjon [26]

	Norcem Anlegg
Finhet (m ² /kg Blaine)	360
Alkalie innhold (ekv. Na ₂ O)	0,6 %
Flygeaske	0 %
Trykkfasthet 1 døgn (MPa)	18
Trykkfasthet 2 døgn (MPa)	30
Trykkfasthet 7 døgn (MPa)	46
Trykkfasthet 28 døgn (MPa)	60

Teknisk datablad er i vedlegg J

4.2.2 Anleggsement FA

Norcem Anleggsement FA er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen kan anvendes de fleste eksponerings-, bestandighets-, fasthetsklasser. Den er spesielt tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere. Tabell 4.2 viser Norcem Anlegg FA sin produktinformasjon.

Egenskaper:

- Kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktiv tilslag
- Relativ lav varmeutvikling
- Velegnet for bruk ved massive konstruksjoner
- Meget gode støplighets- og bestandighetsegenskaper [6]

Tabell 4. 2 Norcem Anlegg FA produktinformasjon [27]

	Norcem Anlegg FA
Finhet (m ² /kg Blaine)	370
Alkalie innhold (ekv. Na ₂ O)	0,60 %
Flygeaske	20 %
Trykkfasthet 1 døgn (MPa)	13
Trykkfasthet 2 døgn (MPa)	22
Trykkfasthet 7 døgn (MPa)	35
Trykkfasthet 28 døgn (MPa)	53

Teknisk datablad er i vedlegg I

4.2.3 Silikastøv

Silikastøv er naturlig å blande inn i blandingene siden den gir positive egenskaper ved fersk og herdet betong. I Norge er silikastøv nærmest et obligatorisk tilsetnings materiale for marin

betong. Selv om silikastøv er sjelden tilsatt sammen med flygeaske er det interessant å se hvilke innvirkning de har sammen.

Silikastøv er et biprodukt fra smelteprosessen som filtreres ut fra røykgassene fra silisium og ferrosilisiumproduksjon. Silikastøv inneholder 85-98 % SiO_2 . Partiklene er kuleformede med partikkelstørrelse i området 0,1 til 0,2 μm , og har amorf struktur oppbygging. Silikastøv er ekstremt finkornet med små, glassaktige kuler med spesifikkoverflate i størrelsesorden ca. 20 000 m^2/kg sammenlignet med sement som har spesifikkoverflate i størrelsesorden på 300-500 m^2/kg . [20]

Egenskapene som høy finhet, høy SiO_2 innhold og stor spesifikk overflate, gjør at silikastøv har stor innvirkning på både den ferske og herdete betongens egenskaper. I tillegg til å forbedre de mekaniske egenskapene ved betongen er silikastøv også brukt som sementerstatning.

I Norge kom silikastøv i bruk som tilsetningsmaterialet på slutten av 1970-tallet. I begynnelsen var materialet billig, mens i dag er silikastøv dyrere enn sement pr kg. Dette har ført til endret bruk av silikastøv.

4.2.4 Flygeaske

Effekten av flygeaske på betongegenskaper kan sammenlignes med effekten av silikastøv betong siden reaksjonsprosess med sementen er nogenlunde lik. Man kan ofte bruke silikastøv effekten som en referanse til å forstå flygeaske effekten på betongen

Flygeaske brukt som sementerstatning har vært kjent siden begynnelsen av 1900-tallet, selv om bruken og forskning ikke skjøt fart før i midten av århundret ved amerikanske institusjoner. De siste 50 årene har bruken av flygeaske virkelig økt dramatisk verden over. Historisk har flygeaske kun vært anvendt for lave doseringer i skala 15 % til 25 % av sementinnhold, mens høye doseringer (30 % til 50 %) ble etter hvert anvendt for massive konstruksjoner for å redusere varmeutvikling. Det er ikke før i senere tid at forskning har påvist at høye doseringer (40 % til 60 %) kan forbedre bestandighet og andre mekaniske egenskaper [10]

Flygeaske er en pozzolant materiale som har fin fordelt amorf oppbygging i likhet med silikastøv men partikkel størrelsen er (10-25 μ) i nærheten av Portland sement. FA inneholder om lag 50% SiO_2 i tillegg til reaktiv aluminat. Flygeaske består av en kombinasjon av hule formet partikler i lag med finfordelte partikler som fyller tomrommet i mellom. I likhet med silikastøv forbedrer også flygeaske mange av egenskapene til betongen og blir brukt som sementerstatning.[20]

Flygeaske er et bi produkt fra kullfyrte kraftverk og siden kullkraftverk i Norge ikke er utbredt er meste av flygeasken importert fra Danmark.

4.2.5 Tilslag

Generelt er det gode bergartsforekomster i store deler av Norge for betongbruk. For eksempel er granitt/gneis, kvartsdioritt og gabbro gode bergartstyper til bruk for betongformål. Tilslaget utgjør 60-70 % av totale betongvolumet, og kvaliteten på tilslaget har stor innvirkning på den betongen. Materialene som brukes i tilslaget, er delt inn etter kornstørrelse. [1]

Det ble benyttet:

- Fint tilslag Forsand 0-5 mm
- Fint tilslag Forsand 5-8 mm
- Grov tilslag Forsand 8-16 mm

Tilslags kurver er i vedlegg A

4.2.6 SP- tilsetningsstoffer

Tilsetninger av SP-stoff i betongblandingen vil dispergere sementpartiklene. Dette fører til mindre vannbehov slik at vi får et økt synkmål.

For betong proporsjonert med v/c-tall 0,45 og lavere, vil vannmengden i forhold til sementmengden bli for liten. Når det i tillegg skal blandes tilslag så vil massen vanskelig la seg støpe, derfor er vi avhengig av SP stoffer for å støpe ut betong med lave v/c tall. SP-stoffer blir brukt for konsistens på betongen slik at den lett lar seg støpe

Det ble benyttet:

- Superplastiserende tilsetningsstoff, Dynamon SP-G fra Rescon Mapei

Teknisk datablad er i vedlegg K

4.3 Forsøksmatrise

Tabell 4. 3 Forsøksmatrise

Sementtype	Temp °C	Alder ved eksponering for klorider, døgn	Total FA-mengde i % av total bindemiddel-mengde uten silikastøv. ¹⁾ Densitet: 2200 kg/m ³	Silika i % av klinker-mengde ²⁾ Densitet: 2200 kg/m ³	Betegnelse	Resept
Anlegg FA (20 % FA) Densitet: 2990 kg/m ³	20 Innpakka i tett plast like etter utstøping og plasseres i luft.	14	20 (0)	0		
				5 (4)	AN-FA-20-14-20-5	AN-FA 4
			35 (23,1)	0		
				5 (3,25)	AN-FA-20-14-35-5	AN-FA 5
		28	50 (60)	0		
				5 (2,5)	AN-FA 20-14-50-5	AN-FA 6
			20 (0)	0	AN-FA-20-28-20-0	AN-FA 1
				5 (4)	AN-FA-20-28-20-5	AN-FA 4
	40 Innpakka i tett plast like etter utstøping og plassering i vannbad ved 40 °C like etter avbinding. 2 døgn etter utstøping over i luft ved 20 °C.	14	35 (23,1)	0	AN-FA-20-28-35-0	AN-FA 2
				5 (3,25)	AN-FA-20-28-35-5	AN-FA 5
			50 (60)	0	AN-FA-20-28-50-0	AN-FA 3
				5 (2,5)	AN-FA-20-28-50-5	AN-FA 6
		28	20	0		
				5		
			35	0		
				5		
Anlegg Densitet: 3140 kg/m ³	20 Innpakka i tett plast like etter utstøping og plasseres i luft.	14	20	0		
				5		
			35	0		
				5		
		28	50	0		
				5		
			20 (25)	0		
				5 (4)	AN-20-28-20-5	AN-1
			35 (53,8)	0	AN-20-28-35-0	AN-3
				5 (3,25)	AN-20-28-35-5	AN-2
			50 (100)	0		
				5 (2,5)	AN-20-28-50-5	AN-4

*

1) Tall i parentes er de prosentene som skal brukes i regneark for proporsjonering for flygeaske

2) Tall i parentes er de prosentene som skal brukes i regneark for proporsjonering for silikastøv

(Denne omregninga er nødvendig fordi regnearket tar utgangspunkt i "sement". I denne oppgava definerer vi total mengde flygeaske i % av total bindemiddelmengde og mengde silikastøv i % av klinker)

5. Eksperimentelt arbeid

5.1 Eksperimentelle forhold

Programmet omfatter totalt 10 ulike betongvarianter, 6 med Anlegg FA-sement (12 prøvingsvarianter) og 4 med Anlegg-sement (4 prøvingsvarianter).

3 prøvesylindere med diameter 100mm og lengde 200mm ble støpt for hver av prøvingsvariantene for å bestemme diffusjonskoeffisienten for kloridinntrengning. Prøvene ble støpt ut i plastrør og utsatt for to herdebetingelser som vist i tabell 4.3:

- Prøver som skal herdes ved 20 °C, pakkes godt inn i plast like etter utstøping og lagres i luft fram til prøving etter 14 eller 28 døgn.
- Prøver som skal herde ved 40 °C, pakkes godt inn i plast like etter utstøping. Like etter avbinding, dvs. etter 5-7 timer, plasseres prøvene i vann ved 40 °C, der de ligger til 2 døgn etter utstøping. Deretter lagres prøvene godt innpakka i plast i luft ved 20°C fram til prøving etter 14 eller 28 døgn.

Deretter blir sylindrerne tildannet slik kapitell 5.8 beskriver for å finne kloridprofilene og diffusjonskoeffisientene

3 stk terninger med dimensjon 100x100x100mm blir støpt for hver prøvingsvariant for å bestemme elektriske motstandsevnen og 28 dagers trykkfasthet. Prøvene støpes i standard former og lagres i vannbad ved 20°C frem til måling av elektriske motstand etter 2, 7, 14 og 28 døgn. Terningene blir også brukt til å fastsette 28 dagers trykkfasthet.

Kapitell 5.6 og 5.7 beskriver prosedyrene for hvordan terningene ble brukt for å finne elektrisk motstandsevne og trykkfastheten.

5.2 Programoppbygging, type resepter

Oversikt over alle resepter som inngår i forsøksprogrammet er vist i tabell 4.3. Alle reseptene har masseforhold 0,40 og konstant matriksvolum på 320 l/m³. Flygeaskemengde er angitt i % av totalbindemiddel mens silikastøv er i % av klinkermengde. Noen kommentar til reseptene:

1. AN-FA 1 er anlegg FA sement med 0% ekstra tilsatt flygeaske og 5% silikastøv av klinkermengde.
2. AN-FA 2 er anlegg FA sement med 15% ekstra tilsatt flygeaske og 0% silikastøv av klinkermengde.
3. AN-FA 3 er anlegg FA sement med 30% ekstra tilsatt flygeaske og 0% silikastøv av klinkermengde.
4. AN-FA 4 er anlegg FA sement med 0% ekstra tilsatt flygeaske og 5% silikastøv av klinkermengden.

5. AN-FA 5 er anlegg FA sement med 15% ekstra tilsatt flygeaske og 5% silikastøv av klinkermengde.
6. AN-FA 6 er anlegg FA sement med 30% ekstra tilsatt flygeaske og 5% silikastøv av klinkermengde.
7. AN 1 er anlegg sement med 20% flygeaske og 5% silikastøv av totale bindemiddel mengde.
8. AN 2 er anleggsement med 35% flygeaske av total bindemiddel og 0% silikastøv av klinkermengde.
9. AN 3 er anleggsement med 35% flygeaske av total bindemiddel og 5% silikastøv av klinkermengde.
10. AN 4 er anleggsement med 50% flygeaske av total bindemiddel og 5% silikastøv av klinkermenge.

5.3 Blanding og utstøping av betong

Reseptenes proporsjonering er lagt som vedlegg for alle reseptene. Fuktinnholdet for tilslaget ble målt ved hjelp av "speedy moisture test" og er tatt med i betraktning under proporsjonering.

I dette forsøket blir K-faktor for silikastøv satt lik 2 og for flygeaske lik 1. Vi kan innføre begrepet masseforhold, $v/(c + k*fa + k*s)$. Masseforholdet er vektforholdet mellom vann og bindemiddel. Mengden $(c + k*fa + k*s)$ betegnes som effektivbindemiddel, hvor vekten av tilsetningsmaterialer (silikastøv og flygeaske) blir multiplisert med en virkningsfaktor, k-faktor. K-verdien forteller om hvor mange deler sement vi kan erstatte med silikastøv uten at egenskapene endres.

Proporsjoneringsprogrammet "proporsjonering.exe" ble benyttet til å utvikle reseptene i forsøksmatrisen. Hver blanding var på 35 liter. Følgende blandingsprosedyre ble fulgt

I blandemaskinen legges pukk, deretter sement og pozzolaner, og sand øverst

Tørrblanding	120sek
Tilsette av vannet	60sek
Blanding	90sek
Blanding og tilsette SP-stoff og resten av vannet	30sek
Blanding	90sek
Måling av synk	
Utsøping	

Det ble støpt 3 terninger (100*100*100 mm) og 3 sylindere (Ø100, lengde 200mm) av hver blanding.

5.4 Tidsplan for forsøkene

Tabell 5.1 viser tidsplanen forsøkene ble støp etter.

Tabell 5. 1

Resept	Beskrivelse	Støpedato	2 døgn	7 døgn	14 døgn	28 døgn	+35 døgn NaCl
AN-FA 1	AN-FA-20-28-20-0	11.02.11	13.02.11	18.02.11	25.02.11	11.03.11	15.04.11
AN-FA 2	AN-FA-20-28-35-0	11.02.11	13.02.11	18.02.11	25.02.11	11.03.11	15.04.11
AN-FA 3	AN-FA-20-28-50-0	11.02.11	13.02.11	18.02.11	25.02.11	11.03.11	15.04.11
AN-FA 4*	AN-FA-20-14-20-5	8.02.11	10.02.11	15.02.11	22.02.11	8.03.11	30.03.11
AN-FA 4*	AN-FA-40-14-20-5	8.02.11	10.02.11	15.02.11	22.02.11	8.03.11	13.04.11
AN-FA 4	AN-FA-20-28-20-5	8.02.11	10.02.11	15.02.11	22.02.11	8.03.11	30.03.11
AN-FA 5*	AN-FA-20-14-35-5	14.02.11	16.02.11	23.02.11	28.02.11	14.03.11	4.04.11
AN-FA 5	AN-FA-40-28-35-5	14.02.11	16.02.11	23.02.11	28.02.11	14.03.11	18.04.11
AN-FA 5	AN-FA-20-28-35-5	14.02.11	16.02.11	23.02.11	28.02.11	14.03.11	4.04.11
AN-FA 6*	AN-FA 20-14-50-5	9.02.11	11.02.11	16.02.11	23.02.11	9.03.11	1.04.11
AN-FA 6	AN-FA-20-28-50-5	9.02.11	11.02.11	16.02.11	23.02.11	9.03.11	15.04.11
AN-FA 6	AN-FA-20-28-50-5	9.02.11	11.02.11	16.02.11	23.02.11	9.03.11	1.04.11
AN-1	AN-20-28-20-5	16.02.11	18.02.11	23.02.11	2.03.11	16.03.11	20.04.11
AN-2	AN-20-28-35-5	16.02.11	18.02.11	23.02.11	2.03.11	16.03.11	20.04.11
AN-3	AN-20-28-35-0	17.02.11	19.02.11	24.02.11	3.02.11	17.03.11	21.04.11
AN-4	AN-20-28-50-5	18.02.11	20.02.11	25.02.11	4.02.11	18.02.11	22.04.11

* Prøvesylindrerne blir eksponert for NaCl etter 14 døgns herding

5.5 Fersk betong støplighet

Den vanligste måten å måle synkmålet på er ved bruk av synkkjegle. Prøvemethoden er gitt i NS-EN 12350-2

Metoden går ut på å fylle kjeglen med aktuelle betong blandingen i tre lag, og hvert lag gjennomstikkes 25 ganger med 16 mm stålstang. Kjeglen løftes deretter opp slik at betongen kan sige sammen på et ikke vannsugende brett. Deretter måles hvor mye betongen siger sammen. Avstand fra toppen av kjeglen ned til høyeste puntet på betongen kalles synkmål. Figur 5.1 viser måling av synkmål.

Synkmål ble målt gjennom blandingsprosessen helt til en tilfredsstillende synkmål ble oppnådd iht. til kravet som ble satt, Synkmål $220\text{mm} \pm 20\text{ mm}$. SP- tilsetning ble benyttet til å justere konsistensen.

Støplighetsegenskapene ble også vurdert visuelt.

Betongblandingene ble proporsjonert med masseforhold $m = v/(c + f_a + 2*s)$ lik 0,40. Lave masseforhold er gunstig for å få gode bestandighetsegenskapene til betongen. Prøvene pakkes godt inn i plast like etter utstøping for å beskytte frie overflater mot uttørkning.



Figur 5. 1 Måling av synkmål

5.6 Trykkfasthet

Alle fasthets resultater er gjennomsnitt av tre 100mm terninger som ble lagret i 20°C vannbad etter standardisert metode angitt fra NS-EN 12350-2 .Fastheten ble mål etter 28 døgn herding for alle prøvestykkene. Figur 5.2 viser utstyret som ble brukt under trykkprøving.



Figur 5. 2 Utstyr for trykkprøving

Resultatene er oppført systematisk i tabell 6.2.

5.7 Elektrisk motstand

5.7.1 Beskrivelse av forsøket

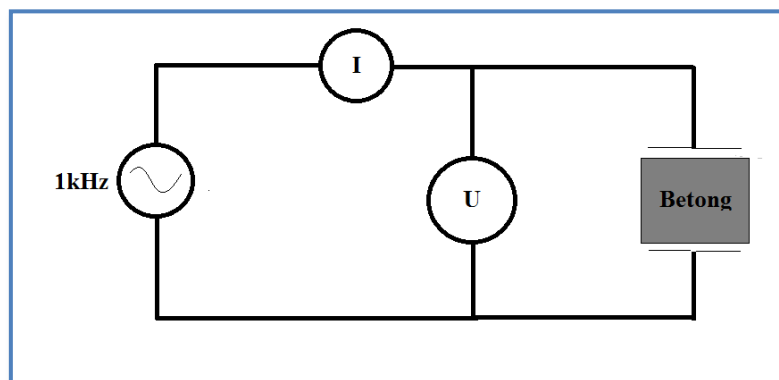
Målingene utføres på 3 støpte terninger med dimensjon 100x100mm for hver av betongreseptene. Terningene blir lagret i vannbad med 20 °C, slik at de er vannmettet frem til prøving. Motstandsmålingene ble utført 2, 7, 14, 28 døgn etter utstøping. Figur 5.3 viser kretstegningen av forsøket.

Multimeteret innstilles på 1kHz og koblet sammen med voltmeter, amperemeter og to 100x100x20mm stålplater. Prøvestykkene ble tatt opp fra vannbad og overflatetørket, deretter ble det påført et tynt lag med elektrisk ledende gel på betongflatene som ble lagt mot stålplatene. Betong terningen ble lagt på en stålplate på undersiden og oversiden, hvor den øverste stålplaten ble presset i midten og sluppet helt til måleverdiene stabiliserete seg. Strøm og spenningsverdien blir lest av og satt inn i ohms lov for å finne motstanden. Etter avlesning av motstand ble gelen tørket av flatene, og det foretas måling av anleggsflatenes areal (A) og innbyrdes avstand (L).

Resultatet beregnes som $R = \text{avlest motstand} \cdot A / L \text{ (}\Omega\text{m)}$

[Ref: SINTEF prosedyre KS 14-05-04-128. ”Bestemmelse av elektrisk motstandsevne.” (Vedlagt)]

5.7.2 Beregning



Figur 5. 3 Viser tegning av system kretsen for måling av elektriske motstandsevne.

$$R^* = \frac{U}{I} \quad (\text{ohms lov}) \quad (5.1)$$

hvor

R^* = elektrisk motstand målt i ohm (målt motstand) [Ω]

U= elektrisk spenning over kretsen målt i volt [V]

I= elektrisk strøm gjennom kretsen målt i ampere [A]

Elektrisk motstand er forholdet mellom elektriskspenning delt på elektriskstrøm.

På grunnlag av målt motstand foretas beregning av spesifikk motstand ved bruk av følgende formel:

$$R = \frac{\text{målt motstand} \cdot A}{l} \quad [\Omega\text{m}] \quad (5.2)$$

Hvor

A = Terningens sideflate [m^2]

L = Terningens sidekant [m]

Eksempel på beregninger:

- Leser av elektriskspenning : 2,779 V
- Leser av elektrisk strøm : 1,01e-3 A

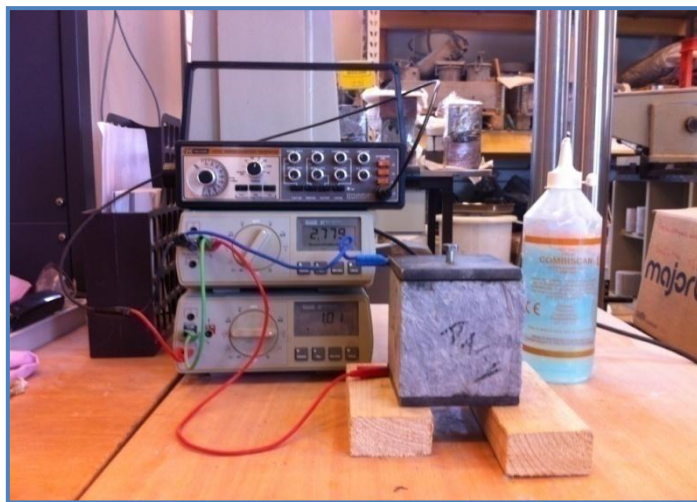
Ohms lov:

$$R^* = \frac{2,779 \text{ V}}{1,01\text{e}-3 \text{ A}} = 2751,48 \Omega$$

Hvor resultatet settes inn i formelen:

$$R = \frac{2751,48 \Omega \cdot 0,1\text{m} \cdot 0,1\text{m}}{0,1\text{m}} = \underline{\underline{275,14 \Omega\text{m}}}$$

Beregningsgangen utføres for tre terninger for alle betong resepter etter 2 , 7 ,14, 28 døgn. Alle resultatene er oppført i tabell 6.3. Figur 5.4 viser utstyre brukt under elektrisk motstandsmåling.



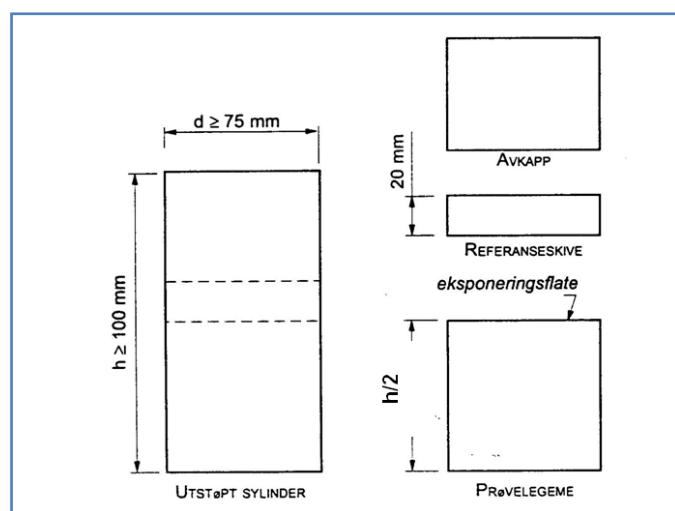
Figur 5. 4 Viser utstyr for måling av elektrisk motstandsevne.

5.8 Kloridinntrengning

5.8.1 Tildanning av prøvelegmer

Sintef Internprosedyre KS 14-05-04-126 beskriver hvordan man finner kloriddiffusjonskoeffisienten for herdnet betong.

En prøveserie på tre betongsylindere ble støpt fra hver prøvevariant med dimensjon på Ø100 og høyde 200 mm. Etter påfølgende herdetiltak som beskrevet i forsøksmatrisen (ref: tabell 4.3) ble utstøpte sylindere kappet i to halvdeler hvor den ene halvdelen ble brukt som prøvelegemet mens den andre ble benyttet for å skjære ut en referanseskive på 20mm. Kun en referanseskive er tilstrekkelig per prøveserie. Figur 5.5 beskriver måten prøvene skal tildannes på. Dimensjonene angitt på figuren stemmer ikke overens med våre prøvelegemer.

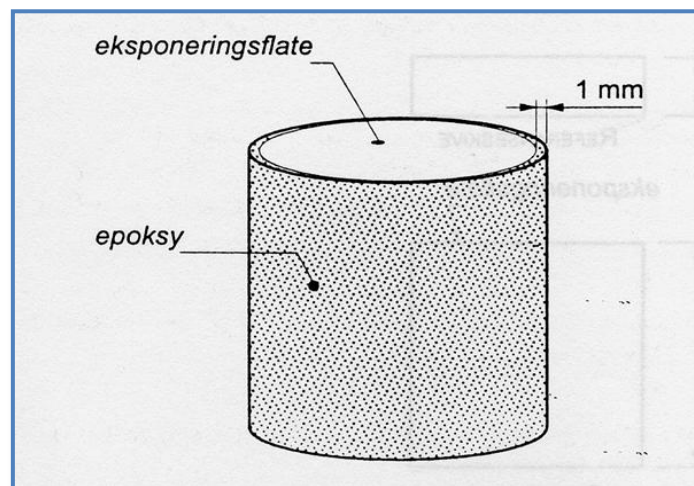


Figur 5. 5 Tildanning av prøvelegemet iht. prosedyre

Prøvelegemene ble deretter neddykket i en mettet Ca(OH)_2 -løsning tre dager i forveien, før prøvene ble tatt ut og satt i klimarom ved 50% RF og temperatur 20 °C. 4 timer etterpå ble et 1mm tykt lag epoksy påført alle frie flater, bortsett fra eksponeringsflaten, slik figur 5.6 og 5.7 viser. Når epoksyen blir herdet, legges prøvestykkene tilbake i Ca(OH)_2 løsning til neste dag. Dagen etterpå blir prøvene neddykket i NaCl løsning.



Figur 5. 6 Prøvestykkene påføres epoxy maling



Figur 5. 7 Prøvestykkene påføres epoksy maling

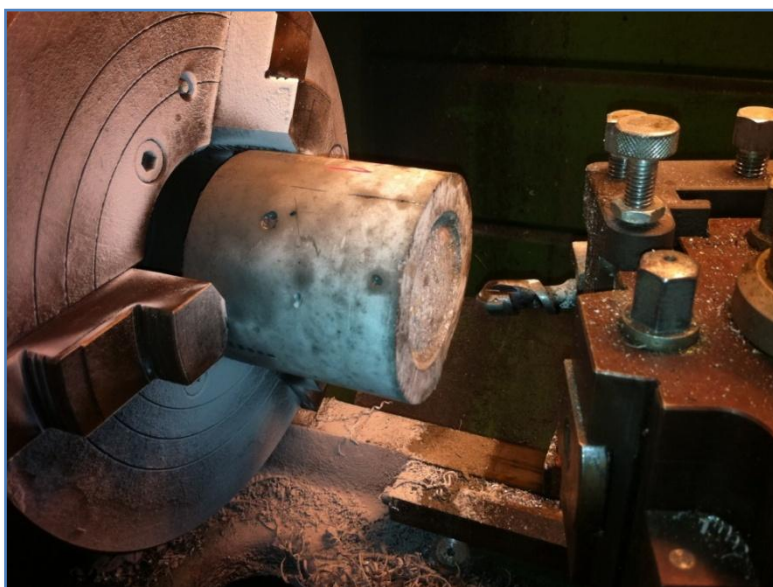
Konsentrasjonen av NaCl i destillert vann er $165\text{g} \pm 1\text{g}$ NaCl pr liter løsning og prøvestykkene blir neddykket i 35 dager. Etter eksponerings tiden er over blir prøvestykkene tatt ut av løsningen og gjort klar for fresemaskinen. Kloridinnholdet blir målt på støv frest fra parallelle sjikt innover fra eksponeringsflaten. Avfresingen av støv foretas innenfor en

diameter på 70 mm og fresedybder på 1,5 mm inn til 10 mm (7 prøver) og 5mm inn til 20mm (2 prøver). Dvs. fresesjikt 0-1.5, 1.5-3.0, 3.0-4.5, 4.5-6, 6-7.5, 7.5-9, 9-10, 10-15 og 15-20. Figur 5.8 viser frese utstyret som ble brukt.



Figur 5.8 Freseutstyr m/ kjernebor motert på motor

På grunn av slitasje på det roterende kjerneboret (figur 5.8), måtte vi etter hvert skifte over til betongbor slik som vist i figur 5.9. Ved hjelp av bevegelse av borekrona er man i stand til å få omtrent samme effekt som for roterende bor til bestemte dybder.



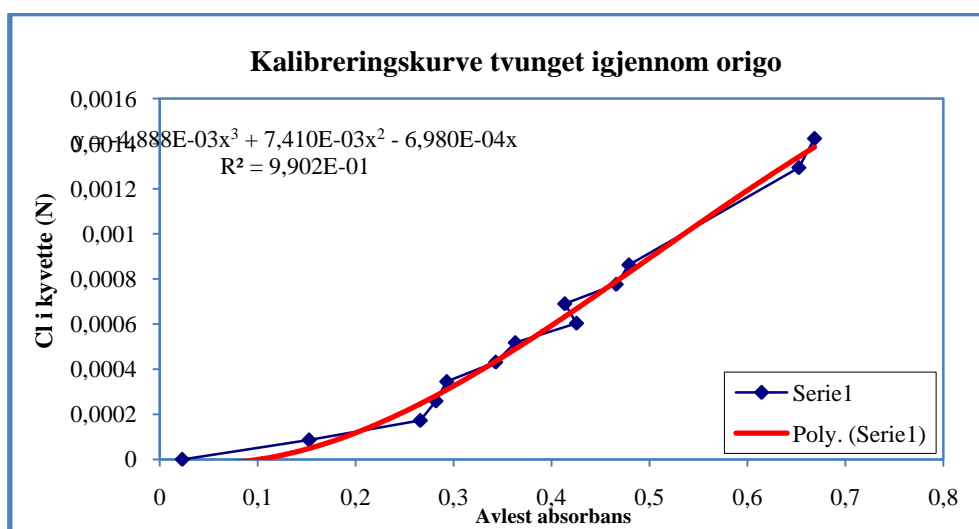
Figur 5.9 Freseutstyr med betongbor

5.8.2 Spektrofotometrisk Analyse

Intern Sintef-prosedyre KS 14-05-04-108 "Kloridanalyse- spektrofotometer" ble benyttet for bestemmelse av total kloridinnhold i betongstøv gjennom spektrofotometrisk analyse.

Prosedyre for etablering av referansekurve

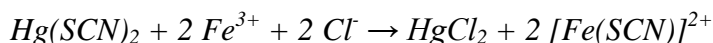
20mm referanse skive nedknares til pulver for å lage referansekurve som angir opprinnelig kloridinnhold i betongen før eksponering. Slik kalibrerer man spektrofotometeret slik at andre kloridmålinger kan sammenlignes med referansemålingene. Det gjøres ved å ta 10 prøver av 5 g referansebetong, hvor man tilsetter Cl^- fra 0% til 2% av betongvekt. Klorid innhold blir målt ved spektrofotometrisk analyse og oppretter en referansekurve ved at målepunktene tilpasses et tredjegradspolynom tvunget igjennom origo; $y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x$. Samtlige måleverdier legges inn i et XY koordinatsystem med konsentrasjon av klorider i kyvetten som y-akse og avlest absorbans som x-akse. Referansekurve er også betegnet som kalibreringskurve. [ref: KS 14-05-04-108 kap.5]. Referansekurven for våre prøver er vist i figur 5.10.



Figur 5. 10 Kalibreringskurve

Prosedyre for måling av kloridinnhold i utfreste prøver

"5g betongstøv veier og oppsluttes i fortynnet salpetersyre ved 80 °C. 2 - 4 ml av oppslutningen filtreres gjennom et membranfilter etter minimum en times henstand ved romtemperatur. 0,25ml av filtratet overføres til en 10 ml målesylinder og tilsettes en fast mengde reagenser og destillert vann. Reagensene og kloridionene danner kvikksølvklorid og kompleksjonen jern(III)tiocyanat som er brunoransje av farge;"



Intensiteten av fargen øker med kloridinnholdet i blandingen. Absorbans av lys med bølgelengde 460 nm i løsningen måles med et spektrofotometer. Deretter sammenlignes verdien med tilsvarende verdi fra en kalibreringskurve, kloridinnholdet for løsningen i kvyetten beregnes og herav totalt kloridinnhold for støvprøven når vekt og fuktighet i denne er kjent. [ref: KS 14-05-04-108 kap.3]. Figur 5.11 viser reagenser klar for spektrofotometrisk analyse. Figur 5.12 viser spektrofotometer som ble brukt til å male kloridinnholdet i betongen.



Figur 5. 11 Blandinger klar for spektrofotometer analyse

Verdiene av C_0 og D_{Cl} bestemmes ved å tilpasse ligning til de målte kloridinnhold ved ikke-lineær regresjonsanalyse etter minste kvadraters metode. Profilets første punkt, bestemt fra det første avfreste sjiktet, utelates fra regresjonsanalysen. De øvrige punkter vektlegges likt.

Beregninger av D_{Cl} ble utført ved bruk av regnearksprogrammet Kloriddiffusjon.xls i Microsoft Excel, utarbeidet av Sverre Smeplass

De beregnede verdier angis som følger:

- C_0 angis med 3 desimaler, som % av tørr betongvekt
- D_{Cl} angis med 2 signifikante siffer, som $10^{-12} \text{ m}^2/\text{sek}$ [ref: KS 14-05-04-126]

Kloridprofiler tegnes ved bruk av det samme Exel regnearksprogrammet kloriddiffusjon.xls utarbeidet av Sverre Smeplass.



Figur 5. 12 Spektrofotometer

5.8.3 Ficks'2 lov

De målte kloridinnholdene tegnes opp som funksjon av dybden under eksponeringsflata.

Kloriddiffusjonskoeffisienten, D_{Cl} , beregnes ihht Ficks 2. lov:

$$\frac{dC}{dt} = D_{cl} \frac{d^2C}{dx^2} \quad (5.3)$$

hvor:

C	=	Kloridinnhold målt i dybden x
x	=	Avstand fra eksponeringsflata
D_{Cl}	=	Kloriddiffusjonskoeffisient
t	=	Eksponeringstid

[ref: KS 14-05-04-126]

5.8.4 Beregning av kloridinnhold i en sjiktprøve

Eksempel: prøveuttak sjikt 0 - 1,5mm

Info:

Filtratuttak (ml) =	0,250	Fe-reagens (ml) =	0,835
Fortynning (ml) =	8,0	Hg-reagens (ml) =	0,835
Varm syre (ml) =	50,0		

Avlest absorbans på spektrofotometer: **0,352 (ABS)**

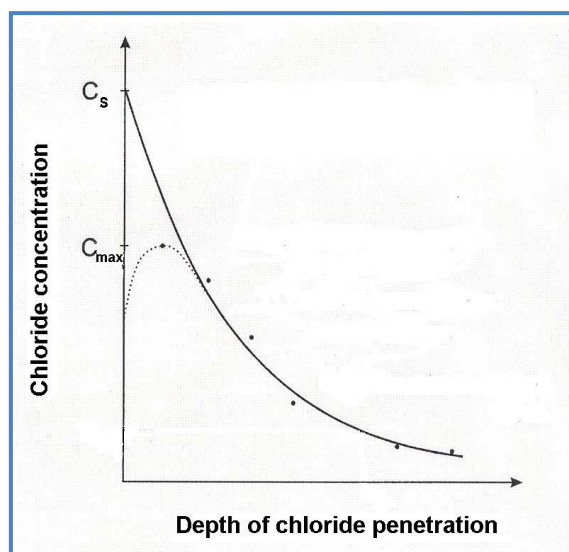
Tilpasningsformel fra kallibreringskurven: $Y = -4,888E-03 X^3 + 7,410E-03 X^2 - 6,980E-04 X$
 $X = 0,352$

Klorid i kyvette: $Y = -4,888E-03 * 0,353^3 + 7,410E-03 * 0,353^2 - 6,980E-04 * 0,353 = 4,59E-04$

Klorid i tørr betongprøve:

$$4,59E-04 * (0,250 + 8,0 + 0,835 + 0,835) * 50 * 35,453 * 100 / (0,25 * 1000 * 4,98) = \mathbf{0,649}$$

0,649 blir satt inn som målt verdi i Excel programmet Kloriddiffusjon.xls, etterfulgt av resterende sjikt innover til 20mm. Når kloridkonsentrasjonen for alle sjikt er satt inn, får vi frem et kloridprofil og en beregnet diffusjonskoeffisient. Samtlige diffusjonskoeffisienter for betongprøvene er oppført i tabell 6.4-6.11 og kloridprofilene legges ved som vedlegg A. Kloridprofilene vil ha form som vist på figur 5.13, hvor kloridkonsentrasjonen er høy i ytterstesjiktet og avtar etter hvert som man kommer inn i dybden.



Figur 5. 13 Eksempel på kloridprofil

6. Resultater

6.1 Egenskaper for fersk betong

Alle betongblandningene er støpt ut med konstant masseforhold $v/(c+\sum kp)$ lik 0,40 og tilnærmet samme matriks- og tilslagsmengde. Dosering av SP-stoff varierer for hver blanding for å oppnå en synkmål på 200 ± 20 mm.

Den visuelle vurderingen av betongens støplighet, tydet på at flygeasken ga mindre seighet i betongene, og støpligheten ble forbedret. Synkmål ble justert under blanding ved bruk av SP-stoffer. Målt synkmål er oppført i tabell 6.1.

Tabell 6. 1 Konsistens ved ulike doseringer pozzolaner

	SP dosering	Mengde tilsatt v/ 35 liter	Synk v/blanding
Resept nr.	% av sement.	g	mm
AN-FA 1	0,8	123	221
AN-FA 2	0,8	96	230
AN-FA 3	0,8	111	223
AN-FA 4	0,9	131	228
AN-FA 5	0,8	145	205
AN-FA 6	1,1	90	210
AN- 1	0,8	129	205
AN- 2	0,8	108	215
AN- 3	0,8	110	238
AN- 4	0,8	118	218

6.2 Trykkfasthet

Målte trykkfastheter for de enkelte betongene er vist i tabell 6.2.

Tabell 6. 2 Trykkfasthet (MPa) ved 28 døgns alder

	100mm x 100mm terninger			
Resept nr	1	2	3	Gjennomsnitt
AN-FA 1	73,21	74,55	74,74	74,17
AN-FA 2	59,11	59,56	59,54	59,40
AN-FA 3	51,99	50,80	49,66	50,82
AN-FA 4	66,42	68,38	66,45	67,08
AN-FA 5	64,89	64,10	64,31	64,43
AN-FA 6	40,40	37,90	39,80	39,37
AN- 1	75,39	78,42	78,96	77,59
AN- 2	54,04	55,81	54,32	54,72
AN- 3	66,55	66,20	67,60	66,78
AN- 4	51,88	51,90	52,14	51,97

*) Vedlagt ligger grafene for trykkprøving

6.3 Elektrisk motstand

Resultatene av motstansmålingene er vist i Tabell 6.3.

Tabell 6. 3 Elektrisk motstand i ohmmeter (Ω m), lagret ved 20 °C i vannbad

Resept nr.	FA % av (FA+ Klinker)	Silika % av klinker	28 døgn elektrisk motstand, Ω m							
			Herdetid i døgn							
			2		7		14		28	
AN-FA 1	20	0	18,59	19,55	29,07	29,32	38,56	38,87	136,30	141,81
			20,19		29,32		36,39		126,96	
			19,85		29,56		41,67		162,19	
AN-FA 2	35	0	17,03	17,94	21,87	24,28	39,37	40,18	109,92	117,47
			17,89		23,78		40,37		113,25	
			18,90		27,19		40,79		129,23	
AN-FA 3	50	0	15,29	15,76	26,91	26,63	39,28	39,57	219,36	193,16
			15,89		28,62		40,95		216,53	
			16,11		24,38		38,49		143,59	
AN-FA 4	20	5	17,26	16,25	25,46	26,54	38,66	47,01	96,69	103,21
			15,58		26,91		46,80		110,31	
			15,92		27,24		55,56		102,64	
AN-FA 5	35	5	14,39	14,48	34,68	34,05	50,18	49,02	243,68	222,52
			14,36		34,89		49,63		201,31	
			14,69		32,58		47,24		222,58	
AN-FA 6	50	5	15,35	15,33	27,11	27,57	39,46	40,35	232,45	230,90
			15,04		27,91		40,47		243,39	
			15,61		27,69		41,12		216,86	
AN- 1	20	5	20,92	22,27	47,46	44,80	87,33	95,67	315,22	311,00
			21,18		46,50		97,84		310,67	
			24,72		40,44		101,83		307,11	
AN- 2	35	0	19,39	18,61	47,63	45,18	67,56	70,72	229,23	267,50
			20,13		45,96		67,33		287,59	
			16,30		41,95		77,26		285,69	
AN- 3	35	5	24,40	21,68	42,84	46,97	92,28	78,55	326,35	312,85
			21,27		48,36		77,88		287,42	
			19,38		49,71		65,48		324,77	
AN- 4	50	5	17,02	18,36	47,21	46,69	68,26	67,89	241,00	246,37
			19,67		48,43		76,71		214,34	
			18,39		44,43		58,69		283,77	

6.4 Kloridinntrengning

Referer til kapittell 5.1 og 5.2 hvor resept- og herdebetingelse er omtalt. Resultater fra beregning av diffusjonskoeffisienten gitt i tabell 6.4 – 6.11.

Tabell 6. 4 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-28-20-0 & AN-FA-20-28-35-0

AN-FA 1			AN-FA 2		
AN-FA-20-28-20-0			AN-FA-20-28-35-0		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)
0-1,5	0,937	6,62	0-1,5	0,656	2,5
1,5-3	0,736		1,5-3	0,443	
3-4,5	0,740		3-4,5	0,303	
4,5-6	0,587		4,5-6	0,107	
6-7,5	0,345		6-7,5	0,134	
7,5-9	0,121		7,5-9	0,017	
9-10	0		9-10	0	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

Tabell 6. 5 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-28-50-0

AN-FA 3			AN-FA 4		
AN-FA-20-28-50-0			AN-FA-20-14-20-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)
0-1,5	0,855	5,62	0-1,5		*
1,5-3	0,652		1,5-3		
3-4,5	0,433		3-4,5		
4,5-6	0,467		4,5-6		
6-7,5	0,271		6-7,5		
7,5-9	0,150		7,5-9		
9-10	0,066		9-10		
10-15	0		10-15		
15-20	0		15-20		

*Prøven ga for høy kloridkonsentrasjon slik at den ikke var representabel

Tabell 6. 6 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-40-14-20-5 og AN-FA-20-28-20-5

AN-FA 4			AN-FA 4		
AN-FA-40-14-20-5			AN-FA-20-28-20-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)
0-1,5	0,904	7,31	0-1,5	0,826	1,10
1,5-3	0,734		1,5-3	0,555	
3-4,5	0,762		3-4,5	0,370	
4,5-6	0,588		4,5-6	0,400	
6-7,5	0,355		6-7,5	0,282	
7,5-9	0,229		7,5-9	0,148	
9-10	0,026		9-10	0,032	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

Tabell 6. 7 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-14-35-5 og AN-FA-40-14-35-5

AN-FA 5			AN-FA 5		
AN-FA-20-14-35-5			AN-FA-40-14-35-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)
0-1,5	0,937	*	0-1,5	0,806	5,95
1,5-3	0,736		1,5-3	0,687	
3-4,5	0,740		3-4,5	0,626	
4,5-6	0,587		4,5-6	0,534	
6-7,5	0,345		6-7,5	0,260	
7,5-9	0,121		7,5-9	0,073	
9-10	0		9-10	0,019	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

*Prøven ga for høy kloridkonsentrasjon slik at den ikke var representabel

Tabell 6. 8 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-28-35-5 og AN-FA-20-14-50-5

AN-FA 5			AN-FA 6		
AN-FA-20-28-35-5			AN-FA-20-14-50-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)
0-1,5	0,946	5,13	0-1,5	0,867	3,92
1,5-3	0,679		1,5-3	0,570	
3-4,5	0,502		3-4,5	0,377	
4,5-6	0,416		4,5-6	0,243	
6-7,5	0,268		6-7,5	0,257	
7,5-9	0,155		7,5-9	0,157	
9-10	0,099		9-10	0,042	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

Tabell 6. 9 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-FA-20-14-50-5 og AN-FA-20-28-50-5

AN-FA 6			AN-FA 6		
AN-FA-20-14-50-5			AN-FA-20-28-50-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl] %	D, 10^{-12} (m ² /s)
0-1,5	0,946	*	0-1,5	0,867	*
1,5-3	0,679		1,5-3	0,570	
3-4,5	0,502		3-4,5	0,377	
4,5-6	0,416		4,5-6	0,243	
6-7,5	0,268		6-7,5	0,257	
7,5-9	0,155		7,5-9	0,157	
9-10	0,099		9-10	0,042	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

*Prøven ga for høy kloridkonsentrasjon slik at den ikke var representabel

Tabell 6. 10 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-20-28-20-5 og AN-20-28-35-5

AN-1			AN-2		
AN-20-28-20-5			AN-20-28-35-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)
0-1,5	0,896	5,22	0-1,5	0,863	5,90
1,5-3	0,649		1,5-3	0,695	
3-4,5	0,607		3-4,5	0,630	
4,5-6	0,377		4,5-6	0,416	
6-7,5	0,297		6-7,5	0,348	
7,5-9	0,139		7,5-9	0,150	
9-10	0,011		9-10	0	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

Tabell 6. 11 Kloridkonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for AN-20-28-35-0 og AN-20-28-50-5

AN-3			AN-4		
AN-20-28-35-0			AN-20-28-50-5		
35 dg eksponering			35 dg eksponering		
Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)	Sjikt (mm)	[Cl ⁻] %	D, 10 ⁻¹² (m ² /s)
0-1,5	0,851	3,01	0-1,5	0,845	4,28
1,5-3	0,611		1,5-3	0,727	
3-4,5	0,450		3-4,5	0,519	
4,5-6	0,277		4,5-6	0,374	
6-7,5	0,089		6-7,5	0,191	
7,5-9	0		7,5-9	0,067	
9-10	0		9-10	0	
10-15	0		10-15	0	
15-20	0		15-20	0	

7. Diskusjon av resultater

I dette kapittelet vil resultatene bli systematisk presentert i tabeller hvor de direkte kan sammenlignes mot hverandre. I tillegg blir teorien og tidligere resultater tatt med som grunnlag for å trekke konklusjoner. Alle kloridprøver er betegnet som for eksempel: AN-FA-20-14-50-5 (Sementtype – herdetemperatur – herdedøgn - % flygeaske - % silikastøv) dvs: Anlegg FA sement – 2 døgn i 40 °C i vann bad også over til luft - 14 døgns herding- 50 % flygeaske av total bindemiddelmengde-5 % silikastøv av klinkermengde. (kap 7.3)

I motsetning til kloridprøvene som blir betegnet ut ifra ”betegnelsen” fra forsøksmatrisa, var det mer praktisk å navnsatte elektrisk motstandsevne- og trykkfasthetsprøver ut ifra ”resept”. For eksempel AN-FA 1, AN-1 etc. (Kap. 7.1 og 7.2). Se forsøksmatrisen i tabell 4.3 for å se nærmere beskrivelse av alle prøvene i dette eksperimentet.

7.1 Elektriskmotstand

Alle resultatene fra måling av elektrisk motstandsevne er gjengitt i Tabell 6.3. Elektriske motstandsevnen ble målt som gjennomsnitt av tre terninger 100x100mm. Prøvestykkene ble lagret i 20°C vannbad frem til angitt prøvealder hhv. 2,7,14 og 28 døgn. Prosedyren angitt i SINTEF ” KS 14-05-04-128 Bestemmelse av elektrisk motstandsevne.” ble brukt for komme frem til oppnådde resultatene. Analysene og diskusjon av resultatene er basert på teoretiske forventninger angitt i kapittel 3.3 og forventninger basert på tidligere gjennomførte forsøk fra ”Bjørvika reseptutviklingsarbeid”. [18]

7.1.1 Effekt av sement

Tabell 7. 1 Effekt av sement på elektrisk motstandsevne, Ωm

Sement	Resept	FA %	Si %	Alder, døgn			
				2	7	14	28
Anlegg FA	AN-FA 4	20	5	16,25	26,54	47,01	103,21
Anlegg	AN-1	20	5	22,27	44,80	95,67	311,00
Anlegg FA	AN-FA 5	35	5	14,48	34,05	49,02	222,52
Anlegg	AN-2	35	5	18,61	45,18	70,72	267,50
Anlegg FA	AN-FA 2	35	0	17,94	24,28	40,18	117,47
Anlegg	AN-3	35	0	21,68	46,97	78,55	312,85
Anlegg FA	AN-FA 6	50	5	15,33	27,57	40,35	230,40
Anlegg	AN-4	50	5	18,36	46,69	67,89	246,37

Tabell 7.1 presenterer systematisk resultatene slik at vi enklere kan se innvirkning av sementtype. Resultatene er også vist grafisk i figur 7.1-7.4. Det kan observeres fra tabellen over at Norcem anlegg-sement gir generelt høyere elektrisk motstandsverdier sammenlignet med Norcem anlegg FA-sement. Denne trenden går igjen fra to døgns alder helt frem til 28døgn. Det er forventet at resultatene fra begge sementypene skal være noenlunde like siden begge sammenligningsprøvene fra tabell 7.1 inneholder lik mengde silikastøv, flygeaske og sementmengde.

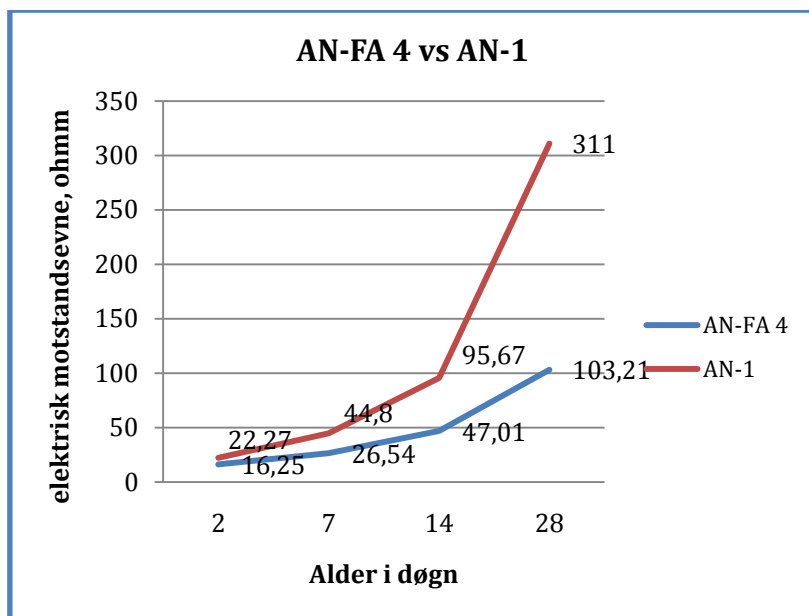
Resultatene fra prøvene gir derimot høyere motstandsverdier for anleggsementen sammenlignet med anlegg FA-sementen. Dette diffrensierer fra tidligere antakelser og kan skyldes "samalingseffekten" eller sementfinheten. Samalingseffekt kan være forårsaket fra blandeverket hos sementprodusenten hvor sement og flygeasken blir sammalt. Denne sammalingen kan føre til at flygeaskepartiklene blir knust til enda finere partikkelstruktur under blandeprosessen, noe som kan gi flygeaskepartiklene større overflate å reagere med. Dette vil redusere varmeutvikling ytterligere for anlegg FA slik at pozzolanreaksjonen blir langsommere sammenlignet for anleggsementen. Varmeutviklingen kan derfor antas å være høyere i anleggsement sammenlignet med anlegg FA, noe som kan være årsaken til at anleggsementen gir bedre elektrisk motstands resultater.

Det kan også skyldes blaine finheten til anleggssementen som er 360 kg/m^2 iforhold til anlegg FA som er 370 kg/m^2 . Jo finere sementen er desto høyere varmeutvikling i reaksjon med vann. Utnyttelsesgraden til tilsetningsmaterialene blir aksellerert av varmeutviklingen som fører til tettere betongstruktur som gir gode motstandsverdier mot elektrisk motstandsevne.

Det er imidlertid mulig at differansen i motstandsverdier mellom sementene blir mindre etter hvert som betongen blir eldre, slik at flygeaskeinnvirkning utnyttes bedre. Derfor kan vi konstatere at tidsaspektet har en sentral innflytelse på motstandsverdiene i flygeaskebetongen. Vi kan også legge merke til at verdiene øker relativt raskt de første ukene, slik som tabell 7.1 viser.

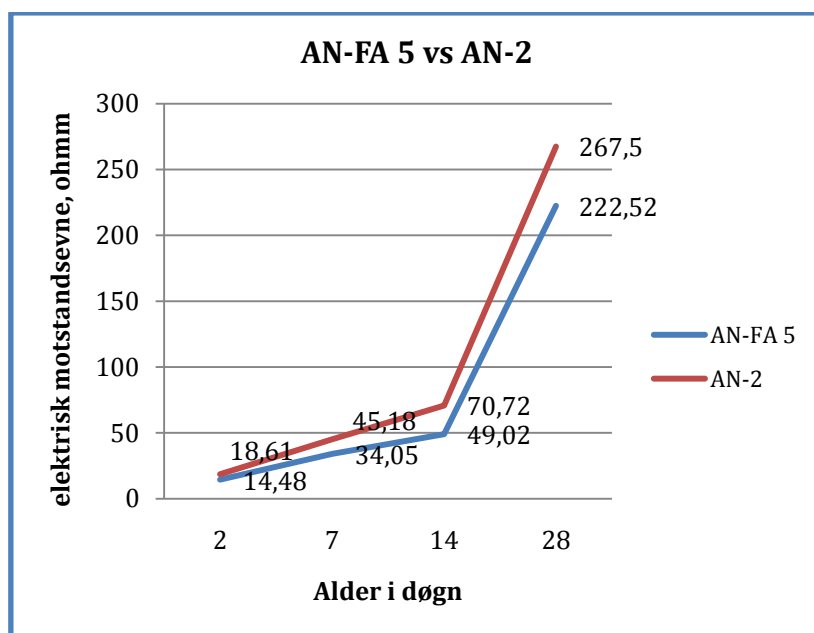
Siden reaksjonstiden for flygeaske er langsom, og kan gi betydelig utvikling i elektrisk motstandsverdi frem til 1-2 år [18] er det vanskelig å si i tidlig stadie hvilken sementtype som vil gi den beste elektriske motstandsevnen med tiden.

Alle verdiene oppnådd ved 28 døgn gir ikke tilstrekkelig beskyttelse siden de er $< 500 \Omega\text{m}$.



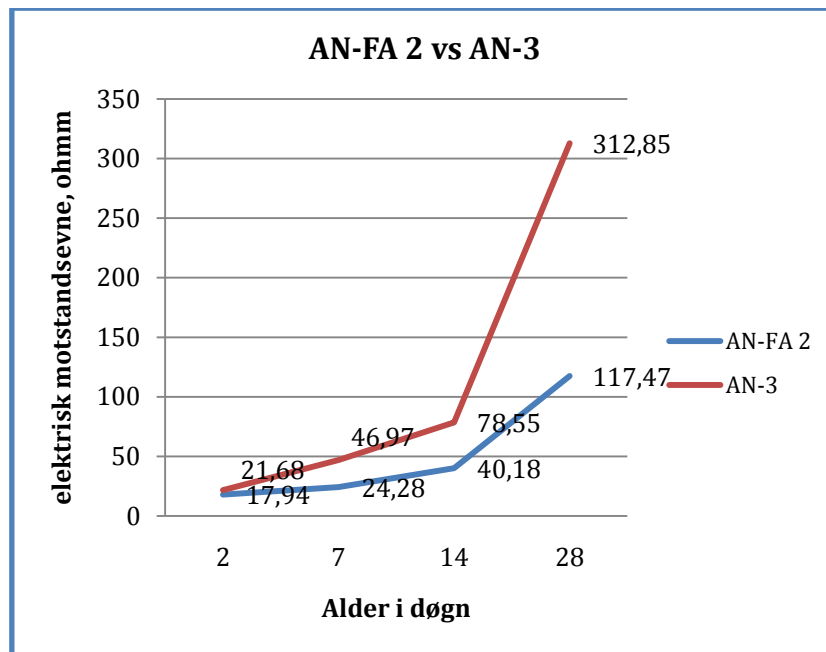
Figur 7. 1 Sammenligning av AN-FA 4 og AN-1, Sementinnvirkning

I figur 7.1 sammenligner vi AN-FA 4 med AN-1 for å analysere sementinnvirkningen. Det kan ses ut ifra figuren over at anleggsementen har høyere elektrisk motstandsevne noe som samsvarer med forventningene, men den store differansen etter 28 dager aviker fra forventningene som ble lagt til grunn. Det kan imidlertid spekuleres om sammalings effekt og blaine finheten kan være grunnen, men det virker ulogisk at differansen skal bli så stor etter 28 døgn.



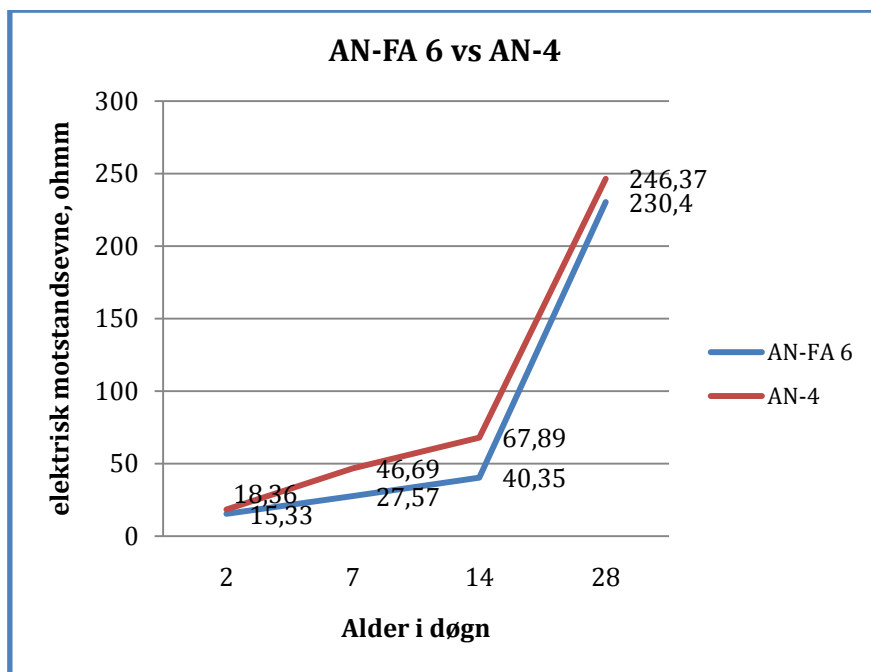
Figur 7. 2 Sammenligning av AN-FA 5 og AN-2, Sementinnvirkning

I figur 7.2 sammenligner vi AN-FA 5 med AN-2 for å analysere sementinnvirkningen. Det kan ses at anleggsementen har noe høyere elektrisk motstandsevne. Differansen kan skyldes sammalingseffekten eller sement finheten. Generelt kan man derfor anta at målte verdier samsvarer med forventningene vi hadde i utgangspunkt.



Figur 7. 3 Sammenligning av AN-FA 2 og AN-3, Sementinnvirkning

I figur 7.3 sammenligner vi AN-FA 2 med AN-3. Vi kan se at anleggsementen har høyere elektrisk motstandsevne. Differansen blir større etter 28 døgn, noe som ikke er i samsvar med forventninger vi hadde i likhet med figur 7.1 for AN-FA 4 og AN-1. Tilsvarende kan det også her spekulere om sammalingseffekten og blaine finheten har en innvirkning, men det virker ulogisk siden differansen blir for stor etter 28 døgn.



Figur 7. 4 Sammenligning av AN-FA 6 og AN-4, Sementinnvirkning

I figur 7.4 sammenligner vi AN-FA 6 med AN-4. Kan vi se at anleggsementen har noe høyere elektrisk motstandsevne i tidligfasen, selv om differansen etter 28 dager blir svært liten. Her er det mer logisk å spekulere om samalingeffekten eller blaine finheten til sementene kan ha en innvirkning som gjør at anleggsementen får noe høyere motstand. Resultatene samsvarer med våre teoretiske forventninger.

7.1.2 Effekt av flygeaske

Tabell 7. 2 Effekt av flygeaske på elektrisk motstandsevne, Ωm

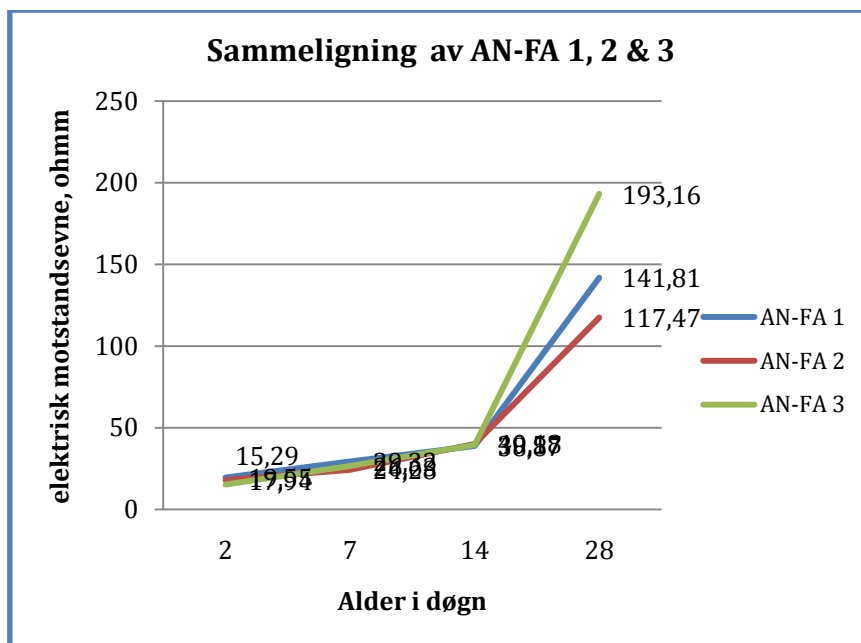
Resept Nr.	FA %	Si %	Alder, døgn			
			2	7	14	28
AN-FA 1	20	0	19,55	29,32	38,87	141,81
AN-FA 2	35	0	17,94	24,28	40,18	117,47
AN-FA 3	50	0	15,29	26,63	39,57	193,16
AN-FA 4	20	5	16,25	26,54	47,01	103,21
AN-FA 5	35	5	14,48	34,05	49,02	222,52
AN-FA 6	50	5	15,33	27,57	40,35	230,90
AN 1	20	5	22,27	44,80	95,67	311,00
AN 2	35	5	18,61	45,18	70,72	267,50
AN 4	50	5	18,36	46,69	67,89	246,37

Tabell 7.2 presenterer systematisk resultatene slik at vi enklere kan se innvirkning av flygeaske. Resultatene er også fremstilt grafisk, slik at det er lettere å se forskjellen ved å sammenligne reseptene mot hverandre (figur 7.5-7.7). Verdiene for motstandsmålingene ved tilsatt flygeaske ligger relativt nærme hverandre frem til den 28 dagen. Det er derfor vanskelig å se en utviklingstrend for resultatene tidligere enn 28 døgn. AN 1 sammenlignet med AN 2 og AN 4 gir høyere elektrisk motstandsevne den 28 dagen (figur 7.7). Dette kan skyldes at AN 2 og AN 4 har tregere pozzolanreaksjon på grunn av større flygeaskedosering som retarderer egenskapsutvikling i tidligalder. Anleggs-sement kan også gi tidligere innvirkning av flygeaskereaksjon grunnet høyere varmeutvikling som nevnt i kapitell 7.1.1. Anlegg FA reseptene gir ingen tydelig mønster på hvordan de vil utvikle seg etter 28 døgn. Siden flygeaske er avhengig av lang reaksjonstid er det vanskelig å konkludere reaksjonen ut fra oppnådde verdier som fortsatt ikke har utviklet seg i sin tidligalder.

Ved å sammenligne resultater i tabell 7.2 med laboratorieundersøkelser fra Bjørvikaprojektet (tabell 3.3) kan man merke at våre oppnådde verdier ligger ganske nær hverandre i størrelsesorden. AN-FA 5 og AN-FA 6 ved 28 døgn ligger verdiene litt høyere enn resultater for "Bjørvikaeksperimentet", det kan skyldes at vi i tillegg har silikastøv innblanding i våre blandinger. Flygeaske reagerer langsomt (reaksjonstid: år). Tidligere forsøk viser flygeaske betong fortsetter å gi økende elektrisk motstand fra 6 mnd til 2 år sammenlignet med betong uten flygeaske.

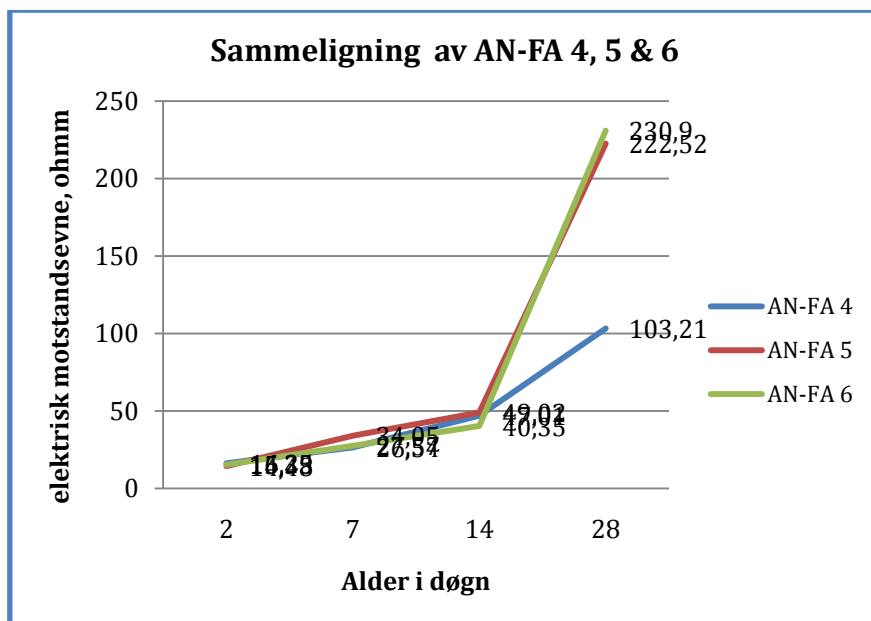
Tidligere erfaring viser også at laboratorielagrede flygeaske betong kan ha opptil 7 ganger høyere elektrisk motstand enn prøver uten, men da er prøvene gjerne vært lagret i en periode over 2 år [21]. Vi kan tydelig se at verdien for motstanden øker i takt med herdedøgn og det hadde vært spesielt interessant å se utviklingen av elektrisk motstandsøkning med økende herdetid.

Alle verdiene oppnådd ved 28 døgn gir ikke tilstrekkelig beskyttelse siden de er $< 500 \Omega\text{m}$. [15]



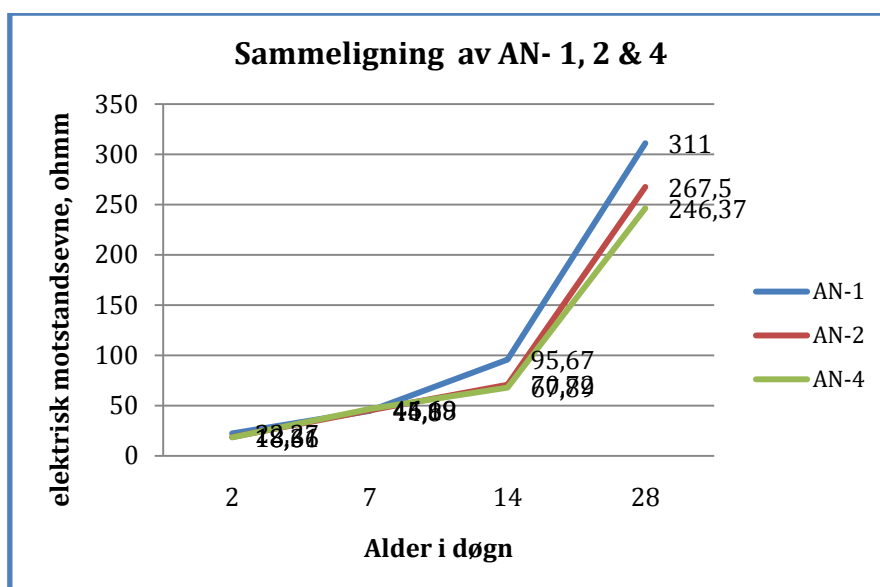
Figur 7. 5 Sammenligning av AN-FA 1, AN-FA 2 og AN-FA 3, flygeaskeinnvirkning

I figur 7.5 sammenligner vi AN-FA 1, AN-FA2 og AN-FA 3 for å undersøke innvirkning av flygeaske på elektrisk motstandsevne. Det kan merkes at verdiene ligger relativt nær hverandre frem til 28 døgn. AN-FA 3 gir høyere verdi for elektriskmotstand sammenlignet med andre prøvene den 28 dagen. Teoretisk forventning til resultatene burde gitt høyest elektrisk motstand for AN-FA 1 etterfulgt av AN-FA 2 deretter AN-FA 3, alt etter flygeaskeinnhold. Jo større dosering desto langsommere flygeaskeutnyttelse i tidligalder som resulterer i lave fasthetsverdier. Vår resultater viser imidlertid at AN-FA 3 (50 % flygeaske ift bindemiddel) gir høyest motstandsverdi noe som aviker fra teoretiske forventningene, mens AN-FA 2 sammenlignet med AN-FA 3 samsvarer godt med forventningene. Høyere dosering flygeaske gir større gevinst med tiden, derfor er det litt spesielt at AN-FA 3 har høyere motstand enn AN-FA 1 og AN-FA 2. Erfaringer fra Bjørvika reseptutvikling viser imidlertid at betongprøve med høyere dosering (60%) flygeaske gir omtrent like resultater etter 1,3,7 og 28 døgn sammenlignet med betongprøver med 40% flygeaske. Betongprøven tilsatt 60 % flygeaske gir høyere resultater enn referanseprøven uten flygeaske [21]. Derfor er det også fullt mulig at AN-FA 3 (50 % flygeaske ift bindemiddel) kan gi noe høyere elektrisk motstands verdi enn prøver med mindre flygeaske.



Figur 7. 6 Sammenligning av AN-FA 4, AN-FA 5 og AN-FA 6, flygeaskeinnvirkning

I figur 7.6 sammenligner vi AN-FA 4, AN-FA 5 og AN-FA 6 for å undersøke innvirkning av flygeaske. Man kan merke seg at verdiene ligger relativt nær hverandre frem til 28 dagen. AN-FA 4 gir mye lavere verdi for elektriskmotstand sammenlignet med de andre prøvene på den 28 dagen. AN-FA 5 og AN-FA 6, motstandsverdier ligger relativt nær hverandre den 28 dagen også. Man kunne forventet litt høyere verdi for AN-FA 4 etter 28 døgn. Flygeaske betongene endrer karakter ganske fort slik vi ser fra 14 døgn til 28 døgn, er det fullt mulig at elektrisk motstandsevnen etter de neste ukene gir et helt annerledes bilde av utviklingen av elektrisk motstandsevne enn det figur 7.6 viser.



Figur 7. 7 Sammenligning av AN-1, AN-2 og AN-4, flygeaskeinnvirkning

I figur 7.7 sammenligner vi AN-1, AN-2 og AN-4 for å undersøke innvirkning av flygeaske. Man kan merke seg at alle prøvene gir verdier som ligger relativt nær hverandre frem til 28 døgn. AN-1 (20 % flygeaske ift bindemiddel) ligger har litt høyere motstand enn AN-2 (35 % flygeaske ift bindemiddel) som igjen har bedre motstand enn AN-4 (50 % flygeaske ift bindemiddel). Dette samsvarer med våre teoretiske forventninger.

Vi kan utifra disse observere at resultatverdiene gitt i tabell 7.7 se at resultatene ikke utvikler seg systematisk i tidligalder, slik at de forventningene vi hadde ikke blir oppfylt i alle tilfeller. Det kan skyldes flygeaskens retarderende innvirkning i tidlig alder. Generelt så har økende mengde flygeaske vist seg å gi betydelige bedre og stabile motstandsverdier over tid slik at herdedøgn på 28 døgn er derfor ikke nok til å konkludere flygeaske innvirkning. Det skyldes at flygeasken ikke har reagert ferdig i sementblandingen og kan endre verdiene raskt på noen få dagers ekstra aldring. Med økende alder vil verdiene stabilisere seg og flygeaske innvirkning fullt utnyttet.

7.1.3 Effekt av silikastøv

Tabell 7.3 presenterer systematisk resultatene slik at vi enklere kan se innvirkning av silikastøv. Resultatene er også fremstilt grafisk slik at det er lettere å sammenligne (figur 7.8-7.11). Vi kan se at silikastøv innblanding generelt øker den elektriske motstandsevnen ved 28 døgns alder for samtlige Anlegg FA- reseptene. Ved tidligere alder enn ved 28 dagen er det vanskelig å se innvirkning av silikastøv.

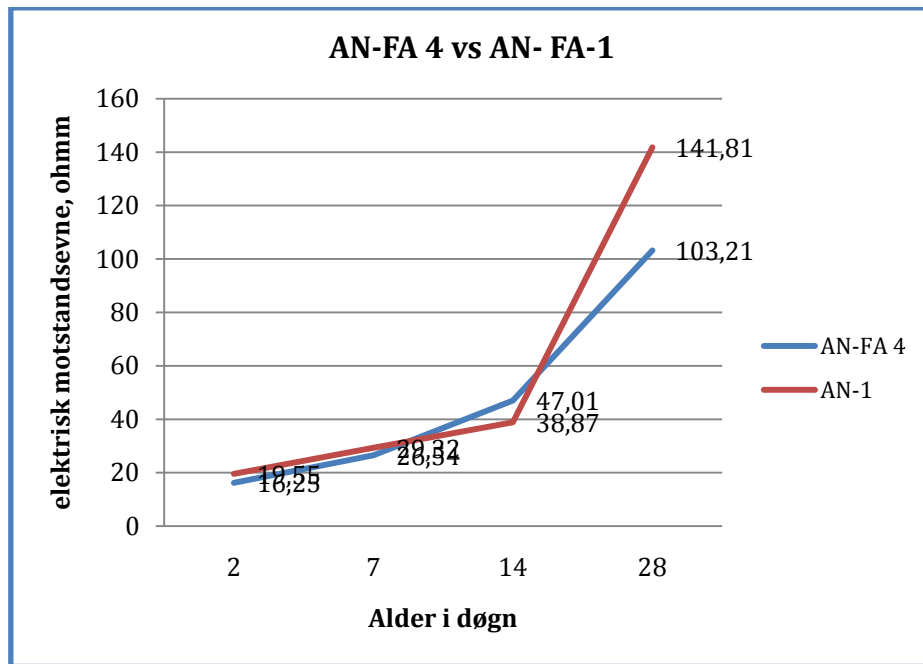
Tabell 7.3 Effekt av silikastøv på elektrisk motstandsevne, Ω m

Resept nr.	FA %	Si %	Alder, døgn			
			2	7	14	28
AN-FA 4	20	0	16,25	26,54	47,01	103,21
AN-FA 1	20	5	19,55	29,32	38,87	141,81
AN-FA 2	35	0	17,94	29,28	40,18	117,47
AN-FA 5	35	5	14,48	34,05	49,02	222,52
AN-FA 3	50	0	15,76	26,63	39,57	193,16
AN-FA 6	50	5	15,33	27,57	40,35	230,40
AN-3	35	0	21,68	46,97	78,55	312,85
AN-2	35	5	18,61	45,18	70,72	267,50

Silikastøv er et hurtigreagerende pozzonlan (reaksjonstid: uker) og gir virkning raskere enn flygeaskebetong. Det kan observeres at silikastøv gir større verdier for elektrisk motstandssevnen i tidligfasen.

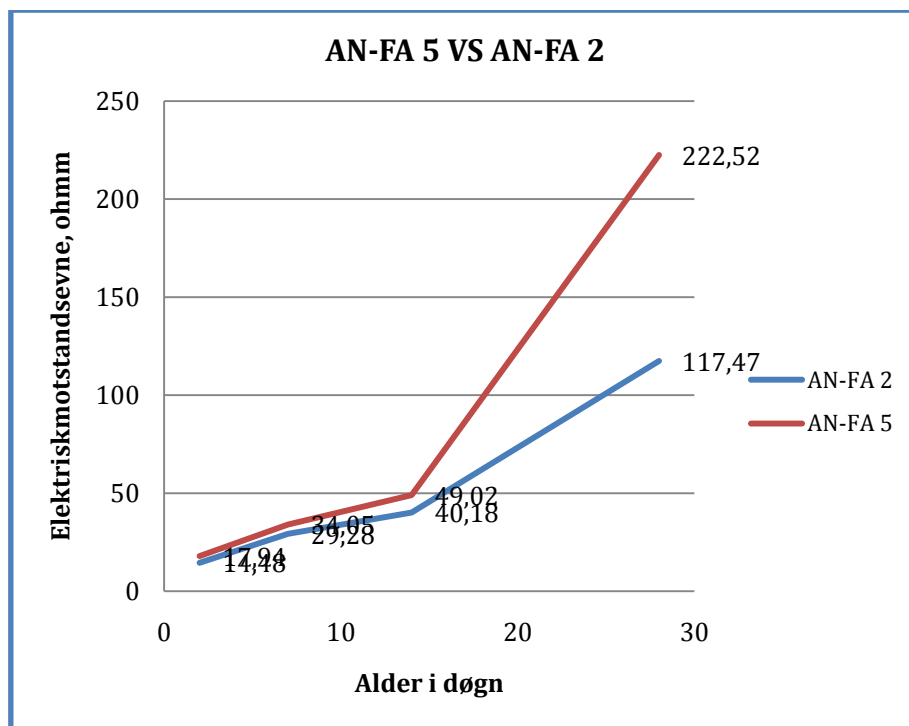
Erfaringer fra Bjørvikasenkeprosjektet (tabell 3.2) viser også at silikastøv tilsetning gir høye verdier for elektrisk motstand, derfor kan vi anta at silikastøv vil gi en positiv innvirkning ved tidlig alder.

Alle verdiene oppnådd ved 28 døgn gir ikke tilstrekkelig beskyttelse siden de er $< 500 \Omega\text{m}$.



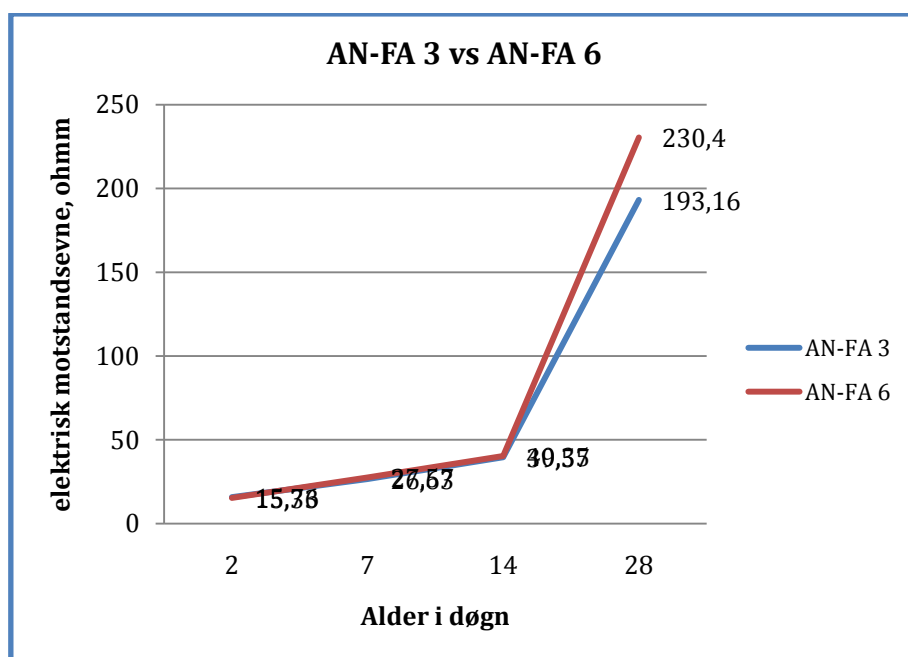
Figur 7. 8 Sammenligning av AN-FA 4 og AN-FA 1, silikastøvinnvikning

Figur 7.8 viser AN-FA 1 tilsatt silikastøv gir høyere elektrisk motstandsevne enn AN-FA 4 uten. Silikastøv er som nevnt en hurtigreagerende pozzolan som gir tettere porestruktur og dermed høye elektrisk motstandsevne i betongen. Resultatet samsvarer med teoretiske forventninger som lå til grunn for denne analysen.



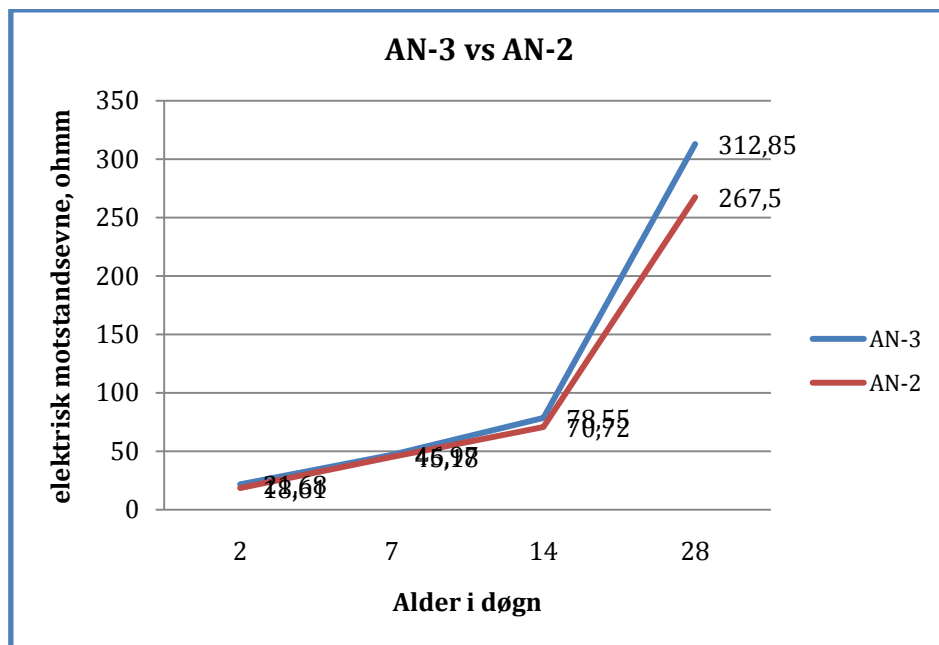
Figur 7. 9 Sammenligning av AN-FA 2 og AN-FA 5, silikastøvinnvirkning

Figur 7.9 viser AN-FA 5 tilsatt silikastøv gir høyere elektrisk motstandsevne enn AN-FA 2 uten. Tilsvarende som analysen over er også utfallet av denne analysen i samsvar med forventningene.



Figur 7. 10 Sammenligning av AN-FA 3 og AN-FA 6, silikastøvinnvirkning

Figur 7.10 viser AN-FA 6 tilsatt silikastøv gir høyere elektrisk motstandsevne enn AN-FA 3 uten. Tilsvarende som foregående analysen er også utfallet av denne analysen i samsvar med forventningene.



Figur 7. 11 Sammenligning av AN-2 og AN- 3,silikasrøvinnvirkning

Resultatene fra figur 7.11 samsvarer ikke med forventningene. AN-3 uten silikastøv viser høyere verdier enn AN-2 som er med silikastøv.

Generelt har silkastøv en positiv innvirkning på elektrisk motstandsevne i tidlig alder, men innvirkningen blir klarere den 28 dagen ut ifra våre resultater. Resutater før 28 døgns alder viser svært liten forskjell mellom prøvene og gir dermed ingen tydelig innvirkning av silikastøv.

7.2 Trykkfasthet

7.2.1 Generelt

Resultatene fra måling av trykkfasthet er gjengitt i Tabell 6.2. Trykkfastheten ble målt som gjennomsnitt av 3 terninger 100x100mm. Prøvestykkene ble lagret i 20°C vannbad fremtil 28 dagers trykkfasthet ble oppnådd. Prosedyren angitt i NS-EN 12350-2 ble fulgt.

Følgende skal trykkfasthetsresultater settes opp mot hverandre for å sammenligne likhetstrekk forskjeller. Innvirkning av sementtype, flygeaske og silikastøv på oppnådde resultatene skal diskuteres for se om vi finner et utviklingsmønster av resultatene. Analysene av resultatene er

basert på teoretiske forventninger og forventninger basert på tidligere gjennomførte forsøk. [18]

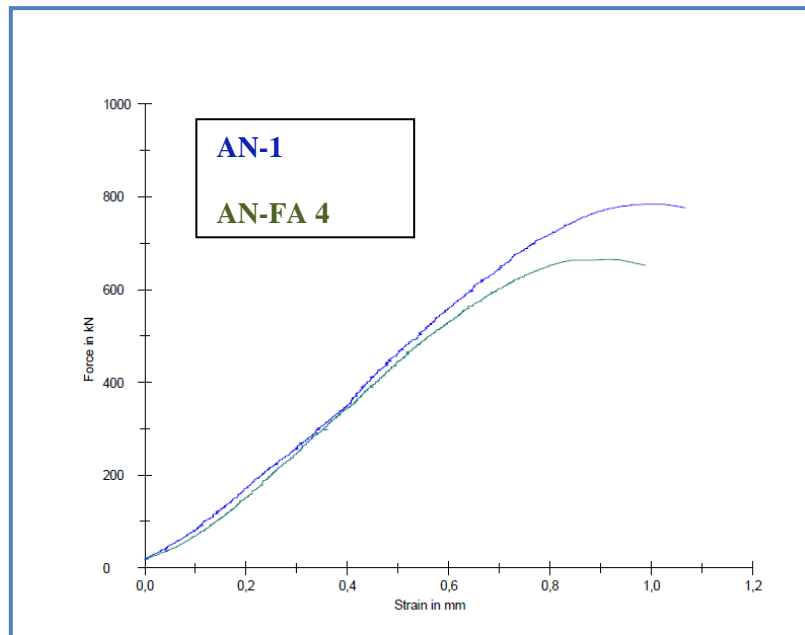
7.2.2 Effekt av sementtype

Tabell 7.4 presenterer systematisk resultatene slik at vi enklere kan se innvirkning av sementtype. Anleggsement gir generelt høyere 28 døgns fasthetsverdier sammenlignet med anlegg FA-sement. Det kan blant annet skyldes blaine finheten til anleggsement som er mindre enn Anlegg FA sementen, slik at varmeutviklingen i anleggsementen kan være noe høyere. Dette vil akselerere utvikling av mekaniske egenskapene til anleggsementen raskere enn anlegg FA. Kanskje har også sammalingseffekt en innvirkning i fasthetsresultatene mellom disse to sementtypene. Det er imidlertid ikke kjent hvorfor avvik fra forventningene forekommer ved sammenligning av AN-FA 5 og AN-2.

Tabell 7. 4 Effekt av sementtype på elektrisk motstandsevne, Ωm

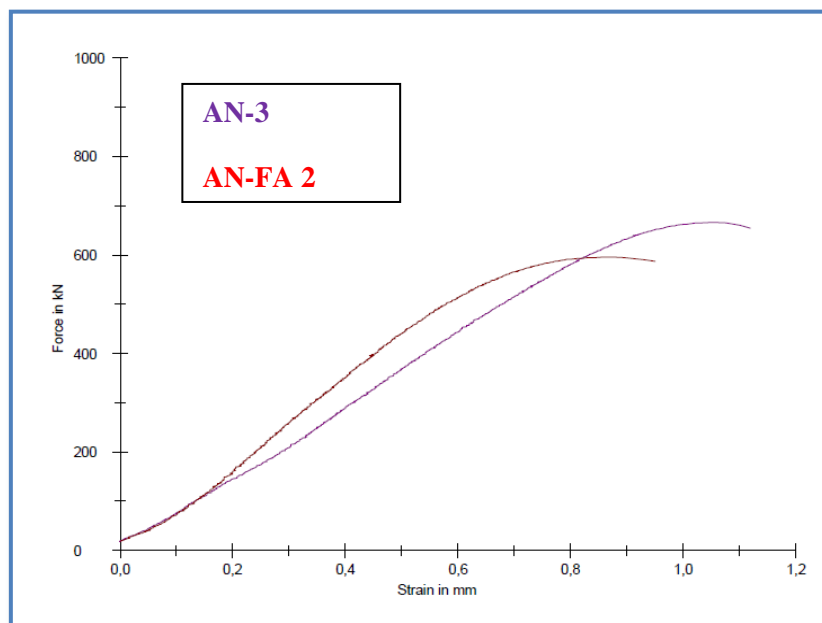
Sementtype	Reseptnr.	FA %	Si %	28 d.
Anlegg FA	AN-FA 4	20	5	67,08
Anlegg	AN-1	20	5	77,59
Anlegg FA	AN-FA 5	35	5	64,43
Anlegg	AN-2	35	5	54,72
Anlegg FA	AN-FA 2	35	0	59,40
Anlegg	AN-3	35	0	66,78
Anlegg FA	AN-FA 6	50	5	39,37
Anlegg	AN-4	50	5	51,97

Resultatene fra Bjørvika reseptutviklings eksperimenter gir også større trykkfasthetsresultater for Anleggsement sammenlignet med Anlegg FA sement.



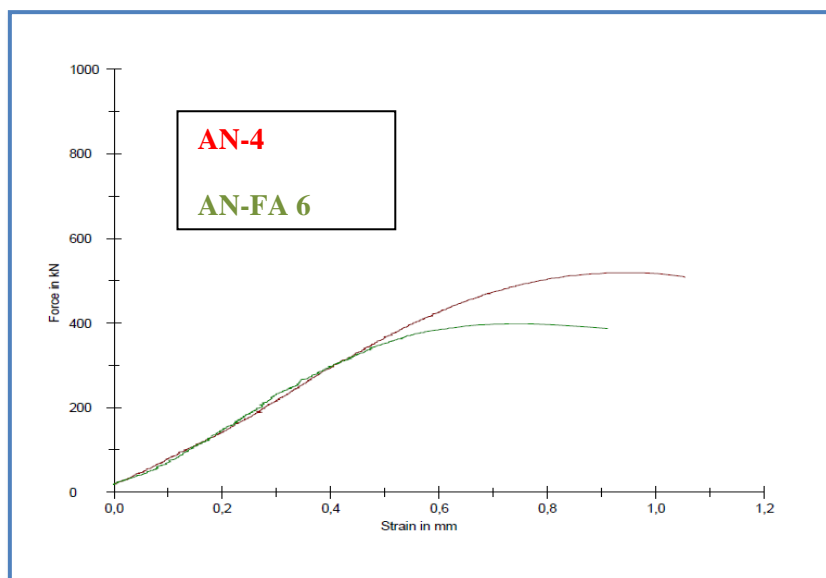
Figur 7.12 Sammenligning av AN 1 og AN-FA 4

Figur 7.12 viser Anleggsement (AN-1) har større 28 døgnsfasthet enn Anlegg FA-sement (AN-FA 4). Denne analysen er i samsvar med teoretiske forventningene før prøven.



Figur 7.13 Sammenligning av AN 3 og AN-FA 2

Figur 7.13 viser Anleggsement (AN-3) har større 28 døgnsfasthet enn Anlegg FA-sement (AN-FA 2) og figur 7.14 viser Anleggsement (AN-4) har større 28 døgnsfasthet enn Anlegg FA-sement (AN-FA 6). Resultatene samsvarer med forventningene som ble lagt til grunn for denne analysen.



Figur 7. 14 Sammenligning av AN 4 og AN-FA 6

Vi kan utifra våre oppnådde trykkfasthets resultater etter 28 døgn konkludere med at Anleggsement gir høyere fasthetsgevinst enn Anlegg FA sementen.

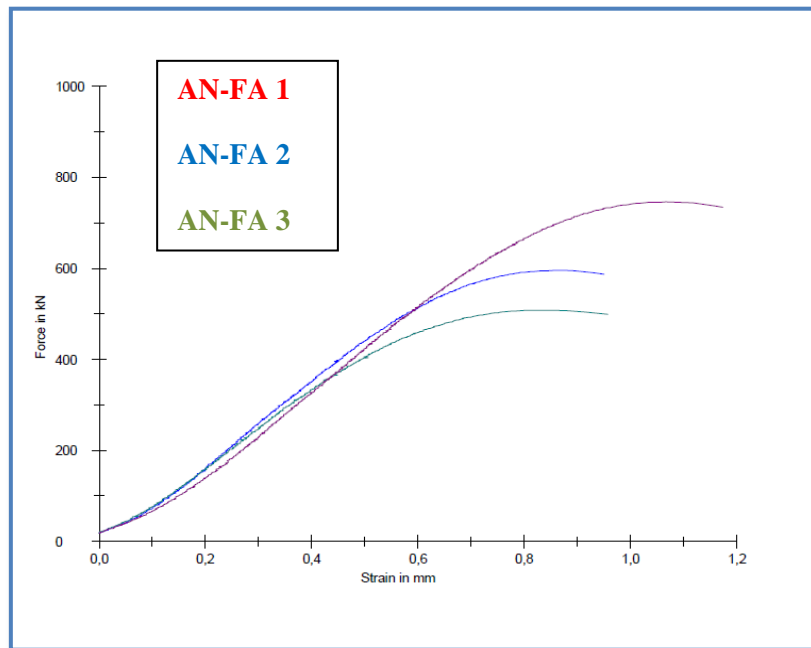
7.2.3 Effekt av flygeaske

Tabell 7.5 presenterer systematisk resultatene slik at det kan enklere ses innvirkning av flygeaske. Som forventet gir høyere mengder flygeaskedosering retardering i mekaniske egenskapene til betongen ved tidlig alder, dette samsvarer med oppnådde resultater hvor vi kan se at trykkfasthetsverdiene for 28 døgns alder synker ved økende flygeaske doseringer. Resultatene viser som forventet at trykkfastheten reduseres desto større sementmengeerstatning med flygeaske. Flygeasketilsetning vil fortsette å gi gevinst ved senere alder.

Tabell 7. 5 Effekt av flygeaske på trykkfasthet , MPa

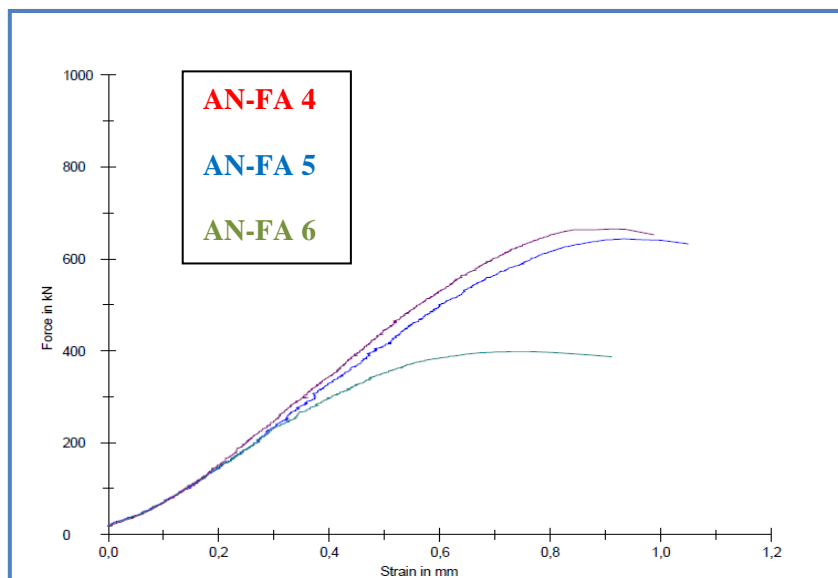
Resept Nr.	FA %	Si %	28 d fasthet
AN-FA 1	20	0	74,17
AN-FA 2	35	0	59,4
AN-FA 3	50	0	50,82
AN-FA 4	20	5	67,08
AN-FA 5	35	5	64,43
AN-FA 6	50	5	39,37
AN 1	20	5	77,59
AN 2	35	5	54,72
AN 4	50	5	51,93

Resultatene fra Bjørvikaeksperimentet [18] gir også ingen tydelig innvirkning av flygeaske etter 28 døgn, men etter 1-2 år ser vi tydeligere fasthetsutvikling i resultatene.



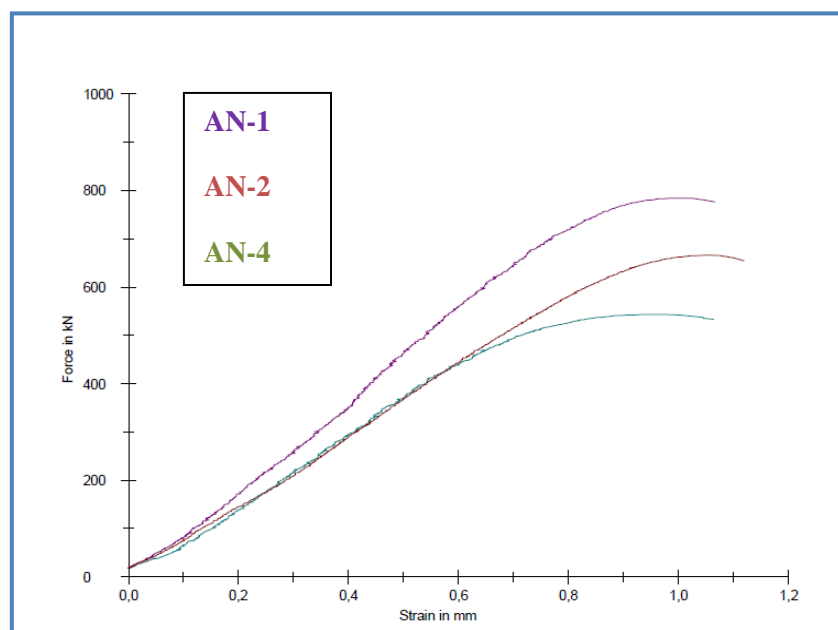
Figur 7. 15 Sammenligning av AN-FA 1,2 & 3

Tabell 7.15 viser trykkfasthet verdiene for AN-FA 1, AN-FA 2 og AN-FA 3 plassert i samme graf slik at de kan sammenlignes direkte. AN-FA 1 har trykkfasthet etter 28 dager på 74,17 MPa, mens AN-FA 2 med 15 % flygeaske tilsatt får mindre trykkfasthet verdi på 59,4 MPa og tilslutt AN-FA 3 med trykkfasthets verdi på 50,82 MPa. Vi kan se en systematisk reduksjon av trykkfastheteten ettersom flygeaske mengden øker.



Figur 7. 16 Sammenligning av AN-FA 4,5 & 6

Det kan også i tabell 7.16 ses en reduksjon av trykkfastheteten ettersom flygeaske dosering øker



Figur 7. 17 Sammenligning av AN-1,2 & 4

tabell 7.17 merke viser en reduksjon av trykkfastheteten ettersom flygeaske dosering øker

Det kan konkluderes ut ifra resultatene at betong med at økende flygeaskeinnhold gjør egenskapsutviklingen langsommere, slik at fasthetsutvikling blir lavere ved høyere mengde flygeasketilsetning.

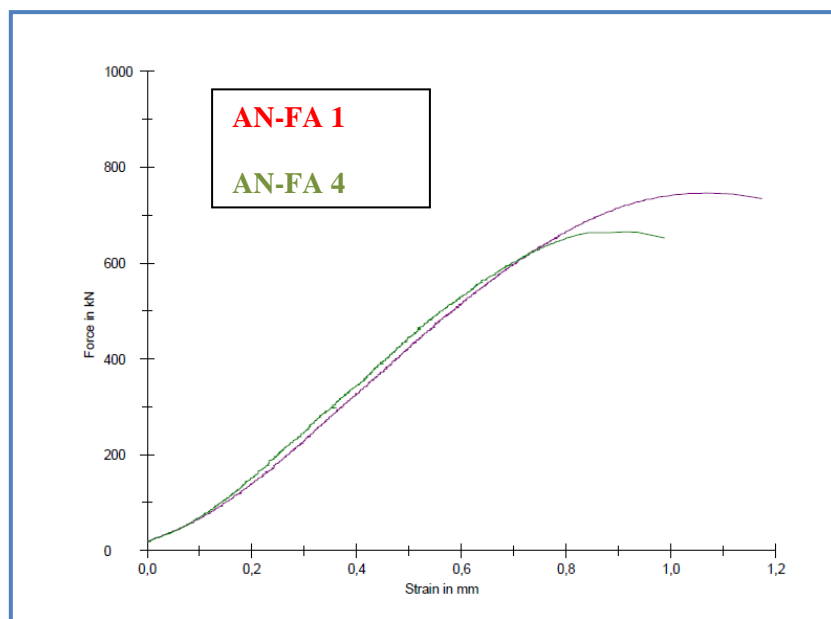
7.2.4 Effekt av silikainnhold

Tabell 7.6 presenterer systematisk resultatene slik at vi enklere kan se innvirkning av silikastøv. Som forventet viser resultatene at silikastøv tilsatt betong gir høyere trykkfasthetsresultater enn tilsvarende betong uten. For Anleggsementprøven AN-2 og for AN-FA 6 gir imidlertid motsatt utslag, ved at silikastøv tilsatte prøven gir lavere fasthetsverdi. For AN-FA 6 skyldes trolig den store mengde sementerstatningen som hemmer fasthetsutviklingen i tidlig alder. For AN-2 er årsaken litt uklart, men høy sementerstatning kan være mulige årsaken.

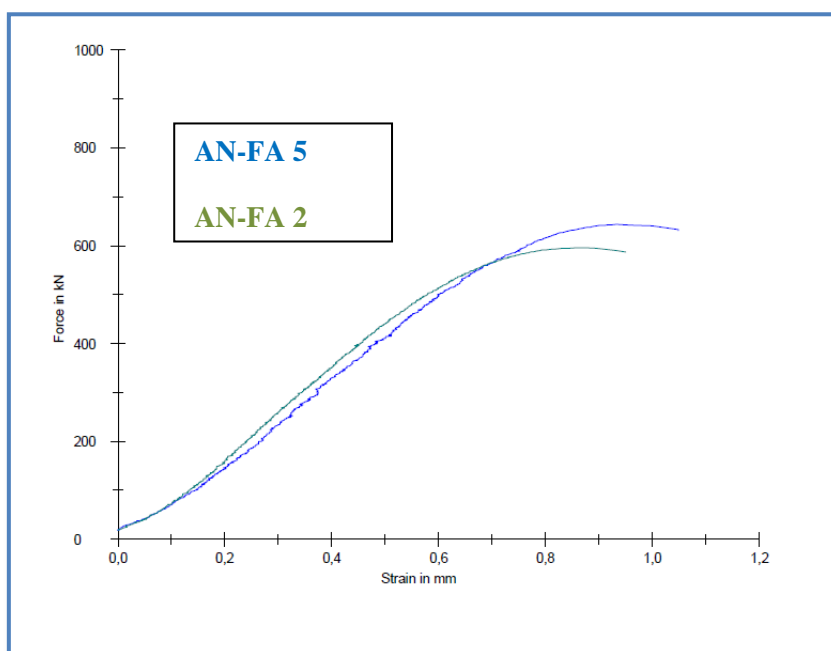
Tabell 7. 6 Effekt av silikastøv på elektrisk motstandsevne , Ωm

Resept nr.	FA %	Si %	28 d. fasthet
AN-FA 4	20	0	67,08
AN-FA 1	20	5	74,17
AN-FA 2	35	0	59,40
AN-FA 5	35	5	64,43
AN-FA 3	50	0	50,82
AN-FA 6	50	5	39,37
AN-3	35	0	66,78
AN-2	35	5	54,72

Figur 7.18 viser innvirkning av AN-FA 1 betong med silikastøv tilsetning sammenlignet med AN-FA 4 som er uten. Det kan merke seg at silikastøv betongen har noe høyere trykkfasthet etter 28 døgns herding enn AN-FA 4.

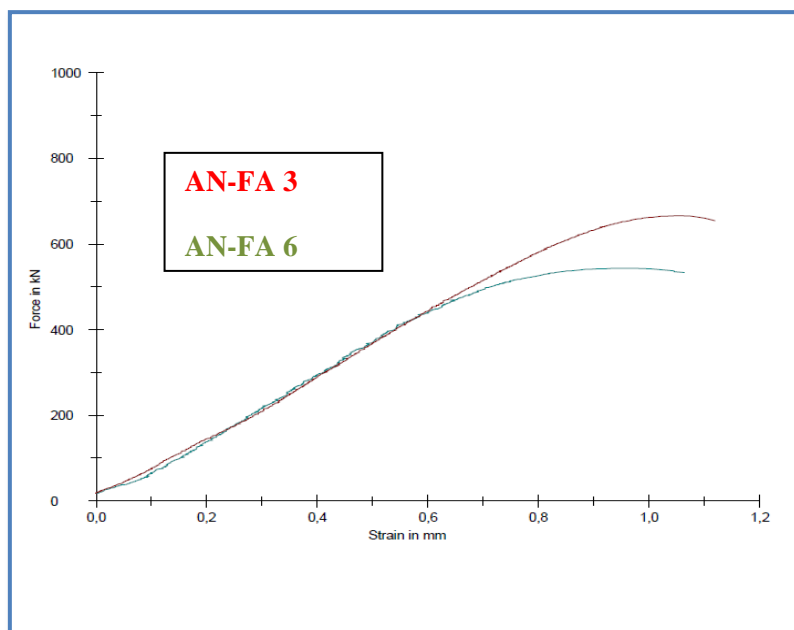


Figur 7. 18 Sammenligning av AN-FA 1 og AN-FA 4



Figur 7. 19 Sammenligning av AN-FA 5 og AN-FA 2

Tilsarende effekt kan også ses i tabell 7.19, hvor AN-FA 5 med silikastøv har høyere trykkfasthet enn AN-FA 2.



Figur 7. 20 Sammenligning av AN-FA 3 og AN-FA 6

I figur 7.20 kan det merkes at AN-FA 6 med tilsatt silikastøv har lavere fasthetsverdi enn AN-FA 3 som er uten.

Silikastøv viser generelt positiv innvirkning i kombinasjon med flygeaskemengde. Ved store mengder flygeaske brukt som sementerstatning, kan det føre til beskjedne silikastøvinnvirkningen etter 28 døgn. Det kan skyldes lave varmeutviklingen som retarderer pozzolanaktiviteten i betongen. Anleggsementprøvene viser også tilsvarende effekt.

7.3 Kloridinntrengning

Resultatene fra måling av diffusjonskoeffisienter er gjengitt i Tabell 6.4 - 6.11. Diffusjonskoeffisienten ble målt fra betongstøv boret ut fra bestemte dybder fra en betongsylinder. Diffusjonskoeffisienten ble beregnet ut som gjennomsnittelig verdi av 3 sylindere eksponert mot saltvann i 35 døgn i henhold til Sintef Internprosedyre KS 14-05-04-126 og KS 14-05-04-108. Begge prosedyrene baserer seg på NT Build 443 metoden ved bruk av spektrofotometer analyser.

Diffusjonskoeffisient resultatene settes opp mot hverandre for å kartlegge innvirkning av sementtype, tilsetningsmaterialet og herdeforhold på de oppnådde resultatene. Deretter skal det videre analyseres for å se om det finnes systematiske trekk ved resultatene. Resultatene vil bli presentert i tabell og figur slik at de kan direkte sammenlignes med hverandre.

Blandingene i tabell 7.7 blir ikke tatt med på grunn av unormalt høye målte kloridkonsentrasjon slik at de ikke var representable. Det var ikke tilstrekkelig tidsrom igjen for å repetere resultatene. Følgende prøver blir ikke tatt med:

Tabell 7. 7 Feilprøver

Resept	Beskrivelse	FA %	Si %
AN-FA 4	AN-FA-20-14-20-5	20	5
AN-FA 5	AN-FA-20-14-35-5	20	5
AN-FA	AN-FA-20-14-50-5	20	5
AN-FA 6	AN-FA-20-28-50-5	20	5

Tabell 6.4 - 6.11 viser at generelt alle betongprøver gir god kloridmotstandsevne etter 35 døgns eksponering, satt opp mot referanse tabell 3.1. Tatt i betraktning flygeaskens reaksjonsegenskaper vil høyere doseringen flygeaske bidra til at diffusjonskoeffisienten ikke får nok tidsrom til å utvikle seg fullstendig i tidlig alder.

Som tidligere nevnt vil flygeaskens langsomme reaksjon på over ett år ha en påvirkning på våre resultater. Eksperimentell arbeid presentert i rapporten ”kloridinntrengning i ressursvennelig kvalitetsbetong” [13] viser flygeaskebetong fortsetter å gi lavere diffusjonskoeffisienter fra 200 døgn til 2 års eksponering sammenlignet med våre resultater som er for 35 døgn.

Flygeaskensreaksjonstid er en viktig årsak til at vi ikke greier å se en klar sammenheng mellom ulike diffusjonskoeffisientene i tidlig alder.

7.3.1 Effekt av sementtype

Tabell 7.8 viser innvirkning av sementtype på diffusjonskoeffisienten. Siden prøvene som sammenlignes mot hverandre inneholder lik mengde flygeaske og silikastøv, kan man analysere sementeffekten direkte. Vi kan merke oss at resultatene generelt ligger relativt nærme hverandre for begge sementtypene. Differansen mellom verdiene er relativt liten slik at det utgjør ingen vesentlig forskjell. Kloridprofilene kan også ses fra etterfølgende figurer 7.21 – 7.24.

Det er ingen forskjell mellom sementene, eneste ulikheten er at FA sementen inneholder 20% flygeaske fra produsenten, mens anleggsementen innblandes 20% flygeaske under blandingsprosessen. Begge prosentandeler er beregnet i forhold til totale bindemiddelmengde. Når totale mengden tilsetningsmaterialer er likt for begge prøvene kan man forvente at sementeffekten vil gi tilnærmet lik resultatutslag for begge sementtypene. Oppnådde sementeffekten er i samsvar med forventningene, men diffusjonskoeffisientensverdiene kunne vært noe lavere.

Det er også mulig at resultatene av anleggsementen kunne gitt enda lavere diffusjonskoeffisient enn anlegg FA sement på grunn av samalingseffekten. Det virker som samalingseffekt og varmeutviklingen forårsaket av sementtype på betongsegenskaper er av liten betydning, men denne effekten bør analyseres nærmere i fremtidige studier.

Tabell 7. 8 Effekt av sementtype på D_0

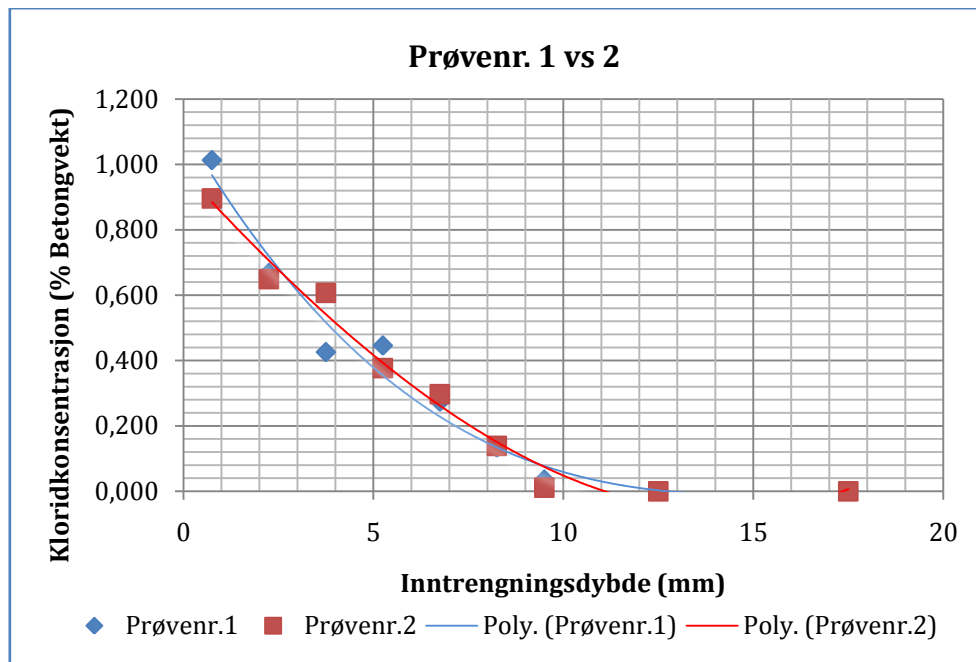
Prøve Nr*	Sement	Beskrivelse	FA %	Si %	Diffusjonskoeffisienten, $D_0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
1	Anlegg FA	AN-FA-20-28-20-5	20	5	5,62
2	Anlegg	AN-20-28-20-5	20	5	5,22
3	Anlegg FA	AN-FA-20-28-35-5	35	5	5,13
4	Anlegg	AN-20-28-35-5	35	5	5,90
5	Anlegg FA	AN-FA-20-28-35-0	35	0	2,5
6	Anlegg	AN-20-28-35-0	35	0	3,01
7	Anlegg FA	AN-FA-40-14-50-5	50	5	3,92
8	Anlegg	AN-20-28-50-5	50	5	4,28

*) Prøvenr er kun gyldig for denne analysen og for figur 7.21 – 7.24

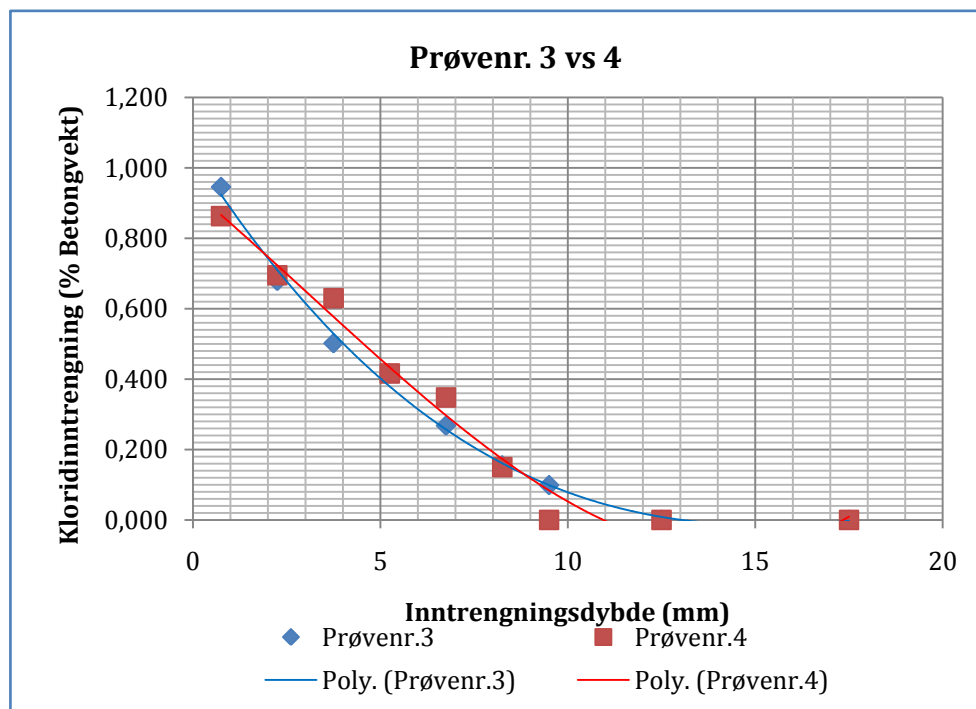
Resultatene sammenlignet med referanseverdier gitt i tabell 3.1 viser at de oppnådde verdiene har relativt høy motstand mot kloridinntrengning, mens prøvenr 5, 6, 7 og 8 gir svært god motstand mot kloridinntrengning.

Verdiene for diffusjonskoeffisientene differensierer ikke i stor grad sammenlignet med hverandre i tidligfasen slik at man er i stand til å se et klart mønster. Dette gjør det vanskelig å konkludere effekten av sement til å ha en betydelig innvirkning på motstand mot kloridinntrengning.

Figur 7.21 viser kloridinntrengnings profil for prøvenr.1 sammenlignet med Prøvenr.2. Vi kan observere at prøvenr.1 har noe høyere kloridinnhold i % betongvekt i ytterstesjiktet (eksponeringsflaten). Prøvenr.1 viser 1,0 % kloridinntrengning mens nr.2 viser 0,9 %. Kloridinnholdet i nr.1 jevner seg raskt ut sammen med nr.2 desto lengere inn vi går i betongsjikt. Kloridinnhold i nr.1 trenger seg inn til 12 mm før den når sitt nullnivå, mens for nr.2 kan vi måle 0% klorid ved 11mm sjiktet. Kloridprofilene ligger tett i hverandre, derfor kan vi anta at sementinnvirkning ikke viser tydelig forskjell ved denne analysen.



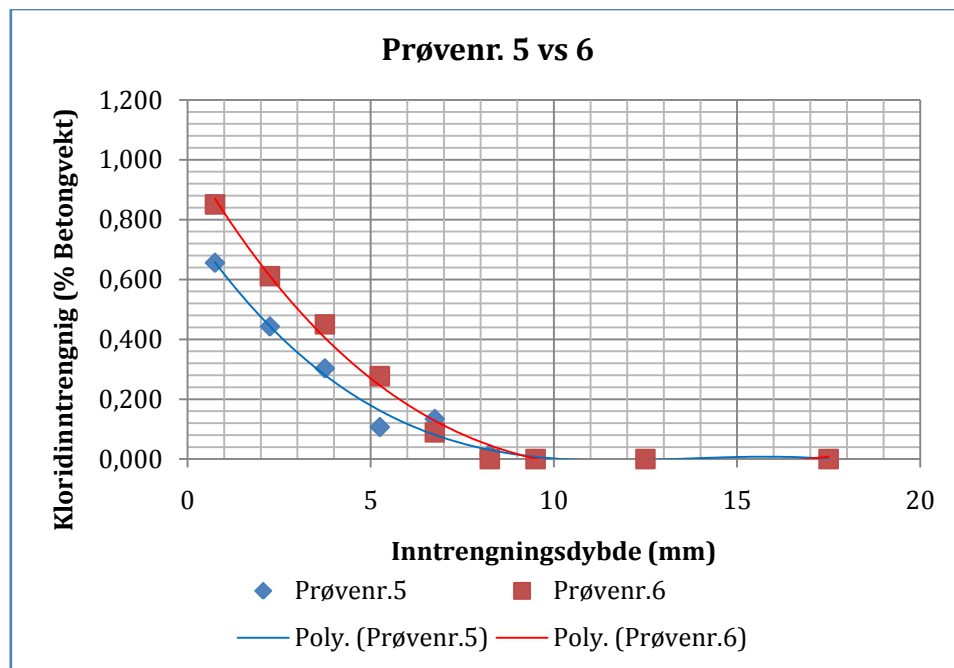
Figur 7. 21 Kloridprofiler for 1 og 2



Figur 7. 22 Kloridprofiler for 3 og 4

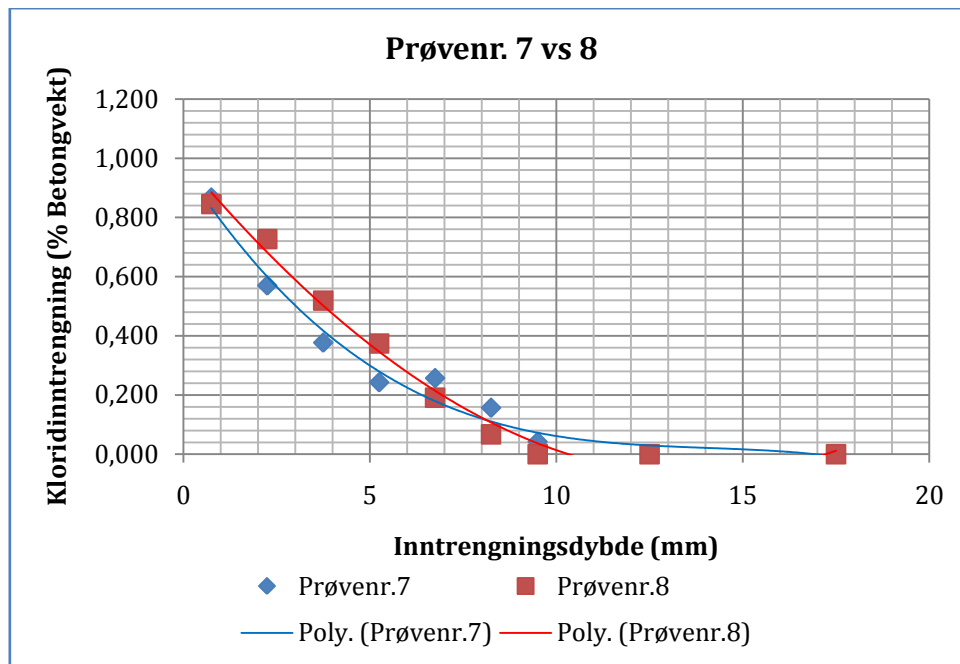
Figur 7.22 viser kloridinntrengnings profil for prøvenr.3 sammenlignet med prøvenr.4. Vi kan observere at nr.3 og nr.4 har nesten samme kloridinnhold i % betongvekt i ytterstesjiktet (eksponeringsflaten), nr.3 viser 0,95 % kloridinntrengning mens nr.4 viser 0,9 %. Differansen

mellom profilene sammenlignet med hverandre er liten. Kloridinnholdet i nr.3 har en noenlunde lik kloridprofil som nr.4 desto lengere inn vi går i betongen. Kloridinnhold i nr.3 trenger seg inn til 12,5 mm før den når sitt nullnivå, mens for nr.4 kan vi måle 0 % klorid ved 11mm sjiktet. Kloridprofilene ligger tett i hverandre. Basert ut i fra grafene kan vi anta at sementinnvirkning ikke viser tydelig forskjell ved denne analysen heller. Det samsvarer med forventningene.



Figur 7. 23 Kloridprofiler for 5 og 6

Figur 7.23 viser kloridinntrengnings profil for prøvenr.5 sammenlignet med prøvenr.6. Vi kan observere at nr.6 har en del høyere kloridinnhold i % betongvekt i ytterstesjiktet (eksponeringsflaten), nr.5 viser 0,66 % kloridinntrengning mens nr.6 viser 0,85 %. Kloridinnholdet i nr.6 har forholdsvis høyere kloridkonsentrasjon enn nr.5 helt frem til ca 7 mm, hvor begge kloridprofiler jevner seg gradvis sammen. Ved 10mm sjiktet har begge prøvne nådd nullnivå for kloridinntrengning. Fra denne kloridprofilen virker det som anlegg FA har lavere kloridinntrengning enn anleggsementen. Dette aviker fra de forventningene vi hadde til resultatene.



Figur 7. 24 Kloridprofiler for 7 og 8

Figur 7.24 viser kloridinntrengnings profil for prøvenr.7 sammenlignet med prøvenr.8. Vi kan observere at nr.7 og nr.8 har tilnærmet lik kloridinnhold i % betongvekt i ytterstesjiktet (eksponeringsflaten), nr.7 viser 0,87 % kloridinntrengning mens nr.8 viser 0,85 %. Kloridinnholdet i nr.7 har en noenlunde lik kloridprofil som nr.8 desto lengere inn vi går i betongen. Både kloridinnhold i nr.7 og nr.8 når sitt nullnivå ved ca 10mm dybde. Kurvetilpasningen til nr.7 er litt forskjøvet høyere opp ved innerste sjikt slik at det kan virke som kloridinntrengning kommer lenger inn enn realiteten (farget blå). Kloridprofilen ligger tett i hverandre, derfor kan vi anta at sementinnvirkning ikke viser stor ulikhet ved denne analysen heller. Det samsvarer med forventningen for resultatene.

7.3.2 Effekt av flygeaske

Tabell 7.9 viser resultater fra innvirkningen av flygeaske på diffusjonskoeffisienten. Prøvene er betegnet ut ifra prøvenummer angitt i tabell 7.9. Det er ikke tydelig å se utviklingstrend ved resultatene oppnådd ved denne analysen. Motstand mot kloridinntrengning blir større desto høyere dosering flygeaske i senere alder, men i tidlig fase kan det forventes en motsatt virkning på grunn av flygeaskens langsomme virkningsnatur. Ved høyere dosering flygeaske kan vi derfor forvente mindre motstand mot kloridinntrengning og høye diffusjonskoeffisienter for betong med mindre mengder flygeaske.

Basert på tidligere erfaringer har store mengder flygeaske en langsom virkningstid på betongen, noe som kan gi flygeaskebetongen mindre kloridmotstand i tidligalder. Det er ikke først etter 1-2 års eksponering at flygeaske effekten er fullt utnyttet. [3,21]

Resultater i tabell 7.9 viser prøvenr.1 (20 % flygeaske av totale bindemiddel) har en diffusjonskoeffisient på $6,62 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ sammenlignet med prøvenr.2 (35 % flygeaske tilsatt av totale bindemiddelet) på $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Ved 50 % tilsatt flygeaske i forhold til totale bindemiddelmengde (nr.4) kan vi merke at diffusjonskoeffisienten øker igjen i forhold til prøvenr.1. Prøvenr.2 gir en meget god motstand mot kloridinntrenging sammenlignet med de andre prøvene. Prøvenr 2 inneholder 15% mer flygeaske enn nr.1, slik at pozzolanreaksjonen forventes å være langsommere og diffusjonskoeffisienten høyere enn nr.1. Derfor avviker dette resultatet fra våre teoretiske forventninger siden vi forventet en mye lavere diffusjonskoeffisient verdi for prøvenr.1 enn nr.2. Diffusjonskoeffisientene antas å ha lavest verdi (høy kloridmotstand) for lave mengder flygeasketilsatt i tidlig alder. Ved senere alder er det fullt mulig at flygeaske reaksjonen kommer fullt i gang slik at høyere dosering flygeaskebetong også gir lave diffusjonskoeffisienter.

Tabell 7. 9 Effekt av flygeaske på D_0

Resept	Prøve Nr [*]	Beskrivelse	F A %	Si %	Diffusjonskoeffisienten, D_0 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
AN-FA 1	1	AN-FA-20-28-20-0	20	0	6,62
AN-FA 2	2	AN-FA-20-28-35-0	35	0	2,5
AN-3	3	AN-20-28-35-0	35	0	3,01
AN-FA 3	4	AN-FA-20-28-50-0	50	0	5,62
AN-FA 4	5	AN-FA-20-28-20-5	20	5	5,62
AN-1	6	AN-20-28-20-5	20	5	5,22
AN-FA 5	7	AN-FA-20-28-35-5	35	5	5,13
AN-2	8	AN-20-28-35-5	35	5	5,90
AN-FA 6	9	AN-FA-40-14-50-5	50	5	3,92
AN-4	10	AN-20-28-50-5	50	5	4,28

^{*)} Prøvenr er kun gyldig for denne analysen og for figur 7.25 – 7.27

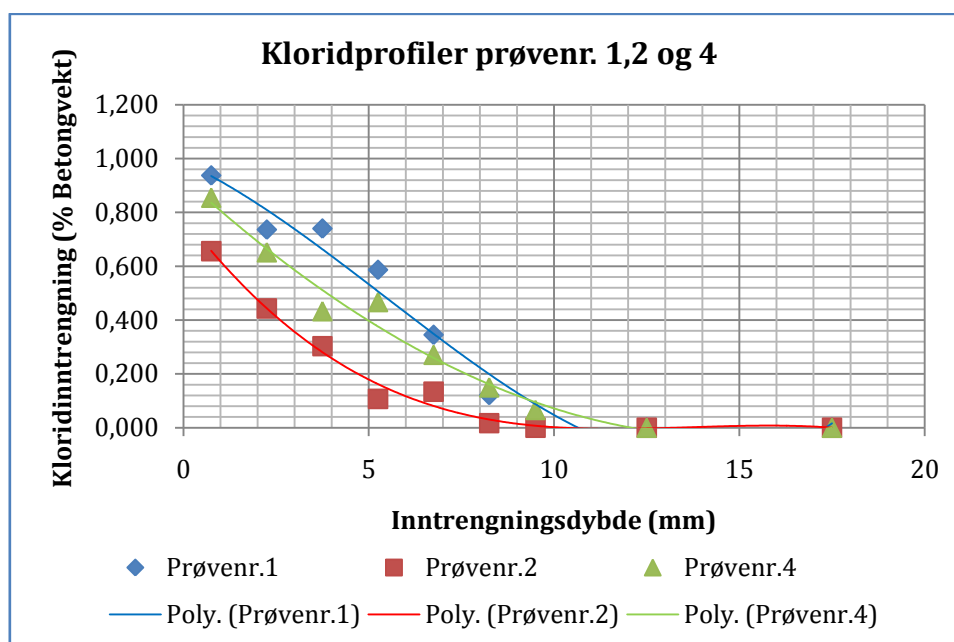
Ved å sammenligne reseptene som er tilsatt 5 % silikastøv, kan vi generelt merke oss at verdiene gir diffusjonskoeffisienter i noenlunde lik størrelsesorden frem til prøver med 50 % flygeaske tilsetning av total bindemiddelmengde. Dette kan skyldes at sementerstatning blir større med silikastøv tilsetning i tillegg, slik at vi ikke får en effektiv pozzolanreaksjonen igangsatt, dermed kan flygeaskeinnvirkningen hemmes i stor grad for ung alder.

Prøvenr 9 og 10 inneholder 50 % flygeaske av total bindemiddelmengde i tillegg til 5 % silikastøv av klinkermengde, hadde man forventet høyere verdier på diffusjonskoeffisienter (mindre kloridmotstand) enn betongresepter med mindre flygeaske. En mulig årsak kan være at prøvenr.9 ble utsatt for herding ved 40 °C, 2 døgn etter utstøping før de ble plassert i luft ved 20 °C, noe som aksellerer flygeaskeinnvirkningen. Aksellerert flygeaskeinnvirkningen

vil gi utslag som tettere betongstruktur som igjen gir lave diffusjonskoeffisienter (større kloridmotstand).

Ved å sette opp resultatene opp mot Tabell 3.1, kan vi se at vi generelt har fått god motstand mot klorid inntrengning på samtlige prøver, mens for diffusjonskoeffisienter under $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ får vi svært høy motstand mot kloridinntrengning.

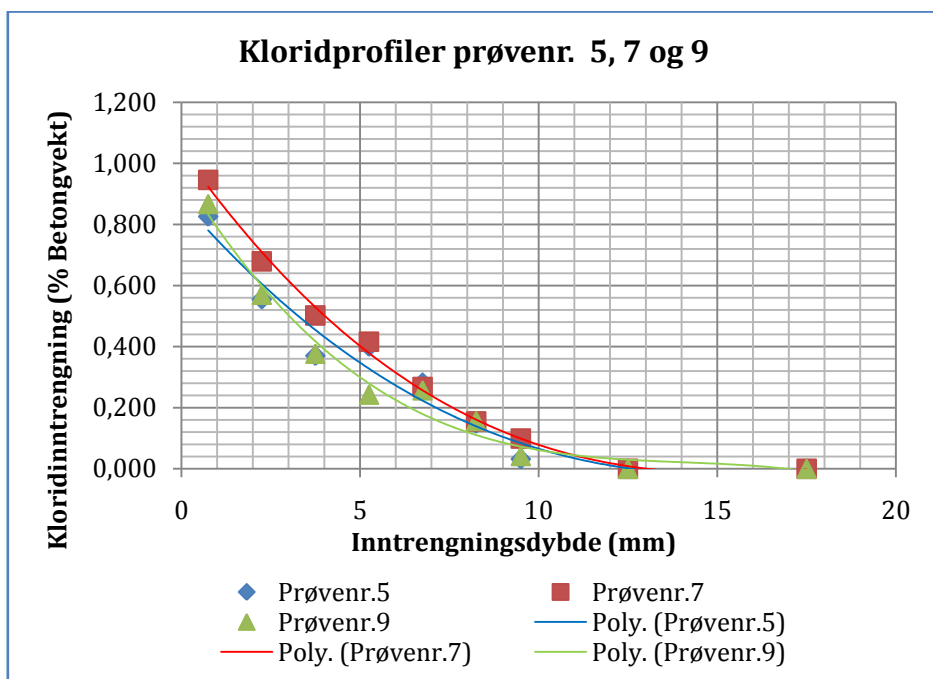
Som diskutert vil flygeaskens langsomme reaksjonstid, vise at våre resultater ikke gir et helt klart bilde av flygeaskeinnvirkning på betongen etter kun 35 dager eksponering. Ved korte eksponeringstider vil heller ikke prøvenes alder være mer enn 2 måneder (28d+35d), pozzolanreaksjonen får heller ikke en fullstendig reaksjon med flygeasken, slik at det er vanskelig å vurdere flygeaskeinnvirkning etter så kort eksponeringstid. Det kan heller ikke observeres en systematisk trend av flygeaskeinnvirkning på diffusjonskoeffisienten. Tidligere erfaringer med flygeaske viser 1-2 år eksponering før flygeaske effekten er fullt utnyttet og er synlig gjennom lave diffusjonskoeffisienter. [13]



Figur 7. 25 Kloridprofiler for 1, 2 og 4

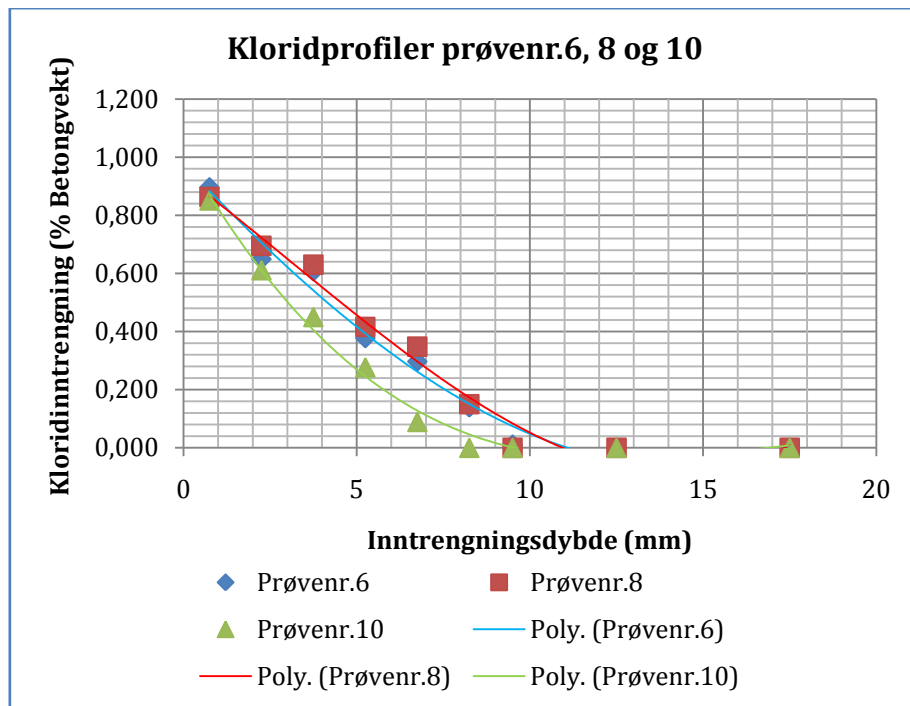
Kloridprofilene i figuren over viser innvirkning av flygeasken på kloridinntrengningen. Prøvenr.2 (35 % flygeaske ift bindemiddel) gir mest motstand mot kloridinntrengning sammenlignet med de to andre. Vi forventet at prøvenr.1 (20 % flygeaske ift bindemiddel) burde gitt lavest kloridinntrengning etterfulgt av nr.2 (35 % flygeaske ift bindemiddel) og tilslutt prøvenr.4 (50 % flygeaske ift bindemiddel). Begrunnelsen er at pozzolanreaksjonen til flygeasken blir langsommere desto større mengder flygeaske som blir tilsatt prøven. Langsom pozzolanreaksjon resulterer i at betongens diffusjonskoeffisient blir høyere og

kloridmotstanden svakere. Derfor avviker resultatene fra de teoretiske forventningene vi hadde.



Figur 7. 26 Kloridprofiler for 5,7 og 9

Kloridprofilene i figuren over viser innvirkning av flygeasken på kloridinntrengningen. Alle prøvene i denne analysen gir kloridprofiler som har et forløp som ligger tett inntil. Prøvenr.9 (50 % flygeaske ift. bindemiddel) gir minst kloridinntrengning tiltross den innholder store mengder flygeaske. Pozzolanreaksjonen av flygeasken i prøvenr.9 kan være forskyndet av herding i 40 °C vannbad sammenlignet med andre prøvene som ble herdet under 20 °C luft. Prøvenr.5 (20 % flygeaske ift. bindemiddel) viser lavere kloridinnhold enn prøvenr.7 (35 % flygeaske ift. bindemiddel) som forventet siden høyere mengde flygeaske har langsommere pozzolanreaksjon.



Figur 7. 27 Kloridprofiler for 6,8 og 10

Kloridprofilene i figuren over viser innvirkning av flygeasken på kloridinntrengningen. Prøvenr.10 gir mest motstand mot kloridinntrengning sammenlignet med de to andre. Kloridprofilen til nr.10 (50 % flygeaske ift bindemiddel) gir lavest kloridinntrengning sammenlignet med kurve for nr.6 og 8.

Teoretisk så forventet man prøvenr.6 (20 % flygeaske ift bindemiddel) til å ha lavest kloridinntrengning etterfulgt av prøvenr.8 (35 % flygeaske ift bindemiddel) og tilslutt nr.10 (50 % flygeaske ift bindemiddel).

Etter 35 døgns eksponering er det utilstrekkelig å trekke en konklusjon av innvirkning av flygeasken på kloridinntrengningsegenskapene. På grunn av sementerstatning av flygeaske vil pozzolanreaksjonen foregå langsomt, siden flygeasken har reaksjonstid på noen måneder. Dette gjør at vi ikke får dannet et klart bilde av resultatene etter så kort eksponeringstid.

7.3.3 Effekt av Silikastøv

Tabell 7.10 viser innvirkningen av silikastøv på diffusjonskoeffisienten. Verdiene for diffusjonskoeffisienten er systematisk presentert slik at det er lett å trekke sammenligninger for å analysere silkastøveffekten.

Tabell 7. 10 effekt av silikastøv på D₀

Resept	Beskrivelse	Prøve nr [*]	FA %	Si %	Diffusjonskoeffisient, D ₀ 10 ⁻¹² m ² /s
AN-FA 4	AN-FA-20-28-20-5	1	20	0	5,62
AN-FA 1	AN-FA-20-28-20-0	2	20	5	6,62
AN-FA 2	AN-FA-20-28-35-0	3	35	0	2,50
AN-FA 5	AN-FA-20-28-35-5	4	35	5	5,13
AN-3	AN-20-28-35-0	5	35	0	3,01
AN-2	AN-20-28-35-5	6	35	5	5,90
AN-FA 3	AN-FA-20-28-50-0	7	50	0	5,62
AN-FA 6	AN-FA-40-14-50-5	8	50	5	3,92

^{*)} Prøvenr er kun gyldig for denne analysen og for figur 7.28 – 7.31

Silikastøv fører til porestrukturen i betongen blir delt inn i enda finere porestruktur. Dette fører til en homogen og tettere betong. Konsekvens av dette er redusert kloridinntrengning i betong. Basert på teorien var lave diffusjonskoeffisienter forventet for eksperimentet.

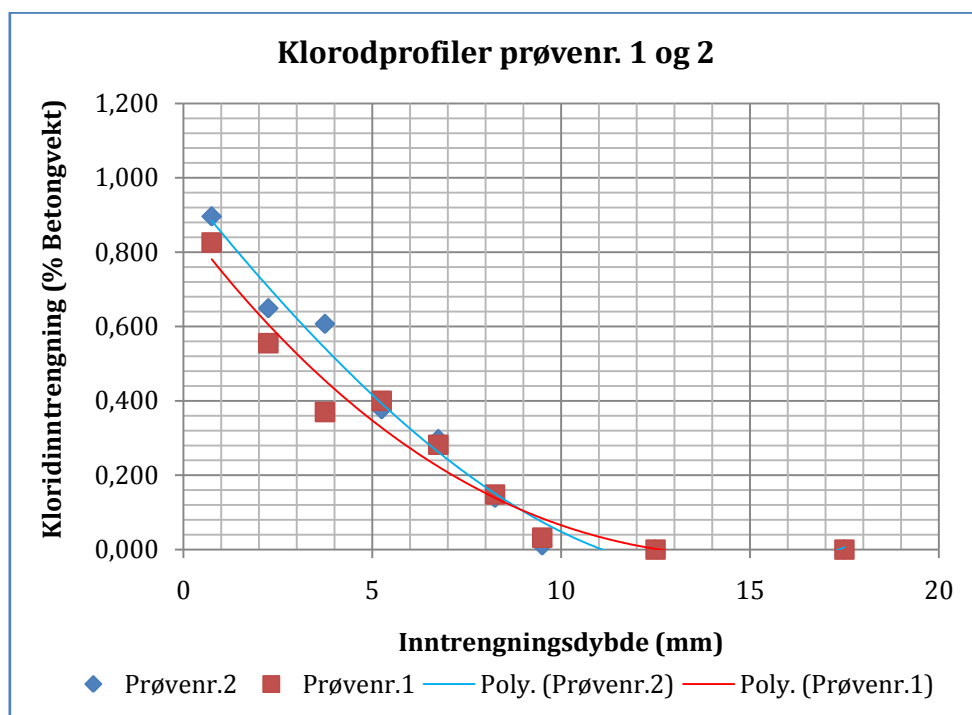
Ved å vurdere resultater som er oppnådd kan vi observere at betong uten silikastøv generelt gir bedre kloridmotstandsverdier sammenlignet betong med silikastøv. Resultatene viser at silikastøv gir generelt svak innvirkning på diffusjonskoeffisienten i kombinasjon med flygeaske i tidligalder. Grunnen kan være at vi får høyere mengde sementerstatning som retarderer pozzolanreaksjonen mellom tilsetningsmaterialene og sementen. Det kan også virke som høyere mengder flygeaske dominerer effekten av silikastøv i blandingene ved 35 døgn eksponering, noe som resulterer i lavere motstandsverdier for silikabetong. Dette er ikke påvist, men en antagelse som krever mer oppmerksomhet. Resultatene er forskjellig fra forventningene som ble lagt lagt til grunn.

Vi kan observere at prøvenr.8 med flygeaske (50 % tilsatt i forhold til bindemiddel) i kombinasjon med silikastøv (5% i forhold til klinkermengde) får en bedre kloridmotstand enn prøvenr 7 som er uten silikastøv. Ved siden av silikastøv innvirkning kan det også skyldes at prøvenr.8 ble utsatt for herding under vannbad med 40 °C, 2 døgn etter utstøping før de ble plassert i luft ved 20°C, dette kan akselererer flygeaskeinnvirkning på betongen.

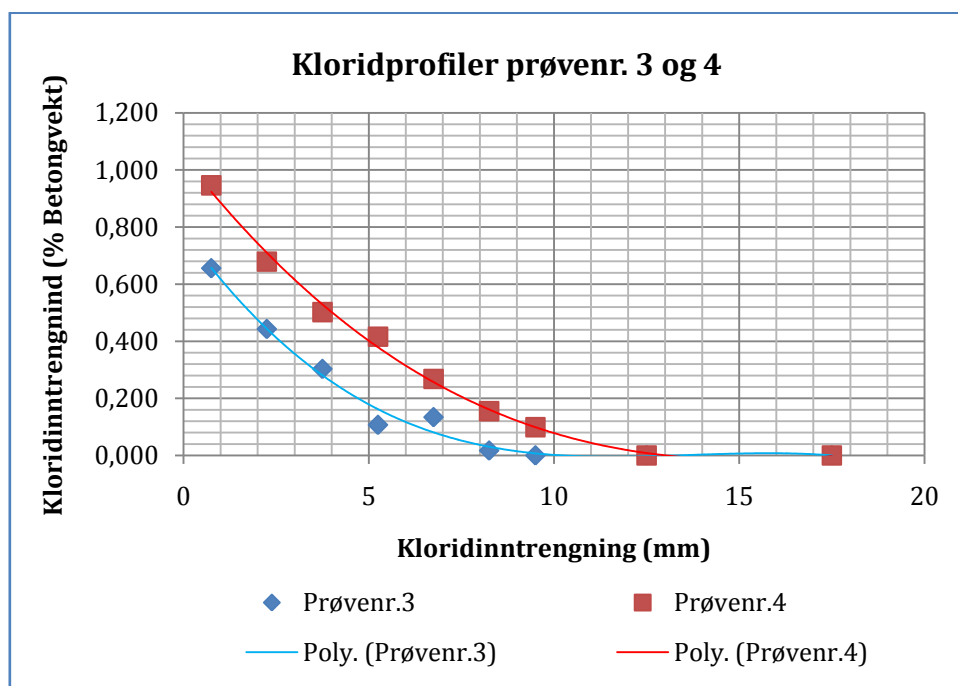
Det kan virke som om flygeaske effekten dominerer over innvirkning av silikastøv. Ved store sementerstatninger kan silikastøvinnvirkning blir litt tregere på grunn av den lave varmeutviklingen. Det kan hende at resultatene blir mer tydeligere ved lenger eksponeringstid enn 35 døgn. Derfor er det vanskelig å konkludere ut ifra våre resultater, hvilke innvirkning silikastøv har i kombinasjon med høyere dosering av flygeaske ved tidlig alder.

Kloridprofilene i figuren under viser innvirkning av silikastøv på kloridinntrengningen. Prøvenr.1 uten silikastøv gir høyere motstand mot kloridinntrengning enn prøvenr.2 som inneholder silikastøv. Teoretisk forventet vi høyere kloridinntrengningsmotstand for prøvenr.2 med silikastøv, siden silikastøv har raskere reaksjonstid enn flygeaske. Avviket kan skyldes at

silikastøv i kombinasjon med flygeaskemengde fører til større mengde sementerstatning som hemmer pozzolanaktiviteten, men denne påstanden er kun en hypotese.

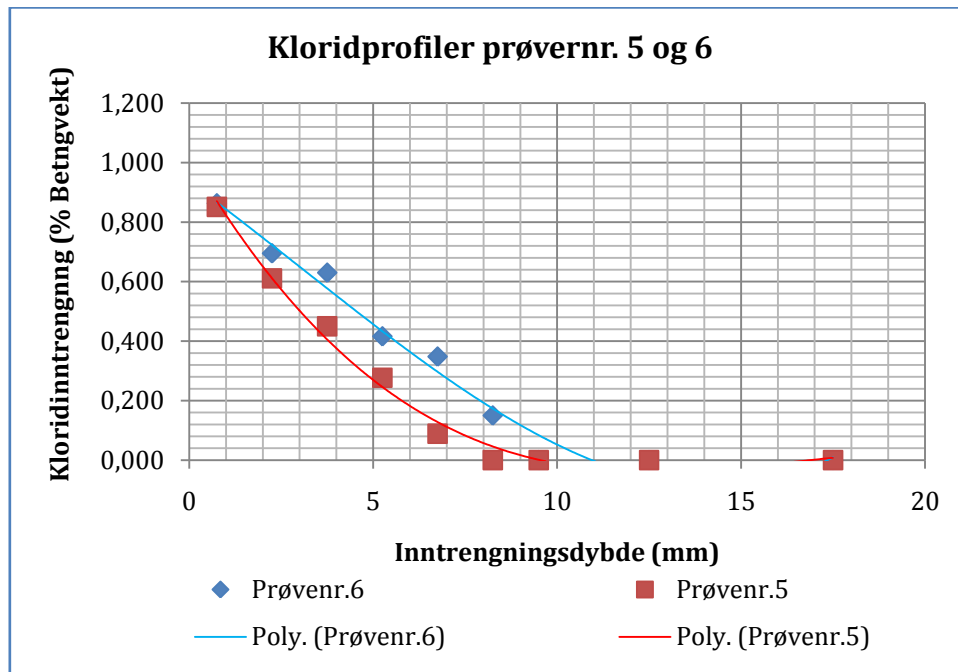


Figur 7. 28 Kloridprofiler for 1 og 2



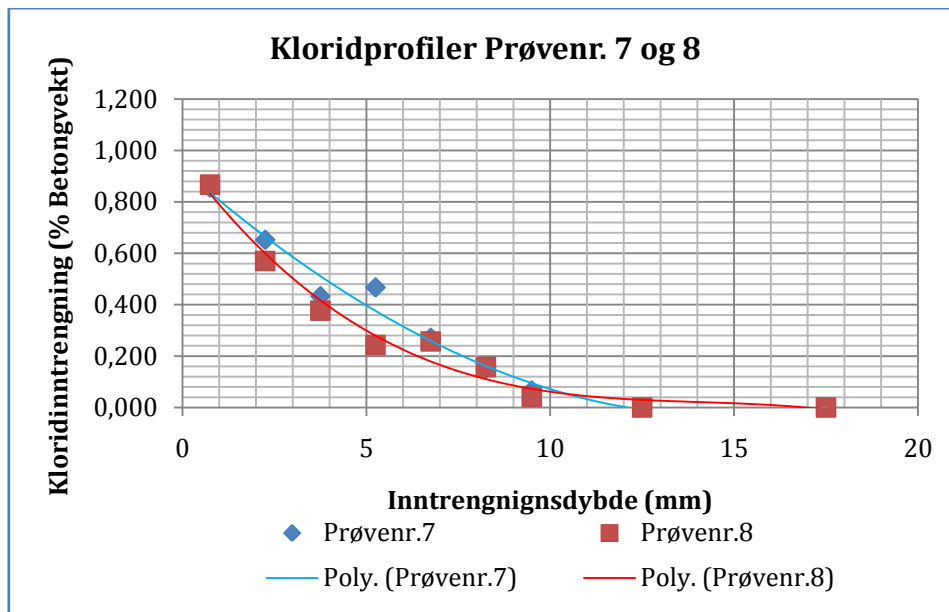
Figur 7. 29 Kloridprofiler for 3 og 4

Kloridprofilene i figuren over viser innvirkning av silikastøv på kloridinntrengningen. Prøvenr.3 uten silikastøv gir høyere motstand mot kloridinntrengning enn prøvenr.4 som inneholder silikastøv. Dette resultatet aviker fra våre forventninger, siden silikatilsetning gjør betongen mer kloridbestandig i tidligalder i følge teorien.



Figur 7. 30 Kloridprofiler for 5 og 6

Kloridprofilene i figuren over viser innvirkning av silikastøv på kloridinntrengningen. Prøvenr.5 uten silikastøv gir betydelig høyere motstand mot kloridinntrengning enn Prøvenr.6 som inneholder silikastøv. Teoretisk forventer man høyere kloridmotstand for betong som inneholder silikastøv enn betong uten. Avviket fra forventningene kan skyldes sementerstatningen blir større ved silikastøv tilsetning, noe som reduserer pozzolan aktiviteten. Denne begrunnelsen er som sagt ikke påvist, men heller en effekt som bør ses nærmere på.



Figur 7. 31 Kloridprofiler for 7 og 8

Kloridprofilene i figuren over viser innvirkning av silikastøv på kloridinntrengningen. Prøvenr.8 med silikastøv gir betydelig høyere motstand mot kloridinntrengning enn prøvenr.7 som er uten. Silikastøv som omtalt i teorien gir betongen en finere porestruktur som resulterer i tett betong. Prøvenr.8 blir i tillegg utsatt for herding under vannbad med 40 °C, 2 døgn etter utstøping før de ble plassert i luft ved 20 °C, dette kan akselerere pozzolanreaksjon på betongen. Det kan antas at det er grunnen til at resultatet stemmer overens med forventningene.

7.4 Feilkilder

En del av resultatene differensierer fra det vi forventet basert på teori og erfaringsrapporter. Det kan ha forskjellige årsaker, noen av årsakene kan være knyttet til punkter som har blitt diskutert i kapittel 7 og også ha sammenheng med praktiske forhold i den eksperimentielle delen.

Freseutstyret som ble benyttet for forsøket ga i utgangspunkt den samme mekanismen som Sintef utstyret (figur 8.1). Figur 5.8 viser bildet av freutstyret som ble benyttet for vårt forsøk i å samle betongstøv fra ulike sjikt innover betongprøven. Vi kan legge merke til at vårt borehode er forskjellig fra den Sintef benytter. Borehode til Sintef virker mye mer slitesterk (fig 8.2) enn den som ble brukt i våre forsøk. Tiltross for at det ble forsøkt å skaffe en slik slitesterk del, ble vi nødt til å benytte et kjernebor med "tynne" kanttenner (fig 5.8). På grunn av rask slitasje på de tynne "tennene" til borehodene og på grunn av økonomiske årsaker måtte vi finne en alternativløsning. Vi ble nødt til å bruke slitesterke betongbor som skrapte betongoverflaten innover til bestemte sjikt, slik figur 5.9 viser. Selv om mekanismen er den samme, så diffirensierer utstyret fra det Sintef bruker, slik at metoden representerer en feilkilde som kan forårsake unøyaktighet på våre sjiktdybder.

Slark ved dreibenken er også en mulig feilkilde som kan ha forårsaket unøyaktighet på våre sjiktdybder.



Figur 8. 1 Freseutstyr til Sintef



Figur 8. 2 Borehode brukt av Sintef

8. Konklusjon

Betongprøvene med forskjellige bindemiddelsammensetninger er undersøkt med hensyn på 28 dagers trykkfasthet, elektrisk motstandsevne etter hhv. 2,7,14 og 28 døgn og kloridinntrengningsmotstand etter 35 døgns eksponering i saltløsning. En hovedmålsetning har vært å dokumentere innvirkning av blandingsementen med flygeaske og silikastøv på kloridinntrengningsegenskapene. Kloridinntrengning er målt i henhold til en akselerert prøvingsmetode bygget på NT Build 443. Internprosedyrer av SINTEF beskriver prosedyren for å finne elektrisk motstandsevne og diffusjonskoeffisienten. Foreliggende rapport gir en teoretisk bakgrunn, utførelse og resultater av laboratorieundersøkelsene utført ved Universitet i Stavanger.

Det er oppnådd svak sammenheng mellom resultatene fra laboratorie og forventningene vi hadde til prøvene spesielt til kloridinntrengningsprøvene. Det var forventet lavere diffusjonskoeffisienter enn oppnådd og at betong med 20% flygeaske i forhold til bindemiddelet burde gitt mye lavere diffusjonskoeffisient sammenlignet med for eksempel betong med 50% flygeaske i forhold til bindemiddelet. Silikastøv tilsetning burde gitt tydeligere innvirkning enn det vi har oppnådd ved 35 døgns eksponering.

Flygeaskebetong viser bestandighetsegenskaper og mekaniskeegenskaper som fortsatt er under utvikling og viser at forventningene ikke ble innfridd etter angitt herde- og eksponeringstid. Et av årsakene til dette kan være flygeaskens langsomme pozzolanreaksjon, slik at en liten del av flygeasken får tid til å få reagerert. Det kan være grunnen til at vi får noe høyere verdier for diffusjonskoeffisienter etter 35 dagers eksponering enn vi hadde fått etter 1 eller 2 års eksponering. Våre resultater viser at silikastøv tilsetning 5 % av klinkermengden tillegg til flygeaske, gir beskjeden innvirkning på diffusjonskoeffisienten. En annen viktig årsak til at forventningene ikke samsvarer helt med resultatene kan ha noe å gjøre med at vi ikke hadde tilstrekkelig freseutstyr, noe som forårsaket unøyaktighet i støvprøvene samlet fra betongsjikt.

Virkningseffekten av flygeasken går igjen i oppnådde resultater for 28 dagers trykkfasthet. Det kan fort merke at ved høyere dosering av flygeaske vil fastheten synke. Betongprøver tilsatt silikastøv ga generelt noe høyere fasthetsbidrag sammenlignet med prøver uten silika. Anleggsement har større varmeutvikling sammenlignet med Anlegg FA, noe som førte til at fasthetsbidraget fra anleggsementen var noe høyere sammenlignet med Anlegg FA sementen. Utvikling av elektriske motstandsevne er også forsinket ved bruk av høye flygeaskedoseringer. Vi kan merke oss at ved mindre mengde flygeaske, så blir den elektriske motstandsevnen større. Silikastøv gir større verdi for den elektriske motstandsevnen, og viser tydelig effekt etter 28 døgn (fig 7.8-7.10). I likhet med trykkfasthet ser en at Anleggsement gir noe høyere verdier sammenlignet med Anlegg FA

Ut i fra eksperimentene som er utført kan det konkluderes med at flygeaskeeffekten kan først utnyttes etter lange eksponeringstider. Siden pozzolanreaksjonen hemmes av store mengder sementerstanning, utvikler flygeaskeeffekten seg langsommere. 35 døgns eksponeringstid er dermed for lite tidsperspektiv til å kunne se fullstendig utviklingsmønsteret av egenskapene til

tilsetningsmateriale. Derfor gir flygeaskeinnblanding noe svakere motstand mot kloridinntrengning i tidlig alder. Silkastøv gir god innvirkning på elektriskmotstansevne etter 28 dager, men for diffusjonkoeffisienten gir silkastøv noe mer beskjeden innvirkning i kombinasjon med høyere mengde flygeaske. Blandingsementer med høyere flygeaskedosering i kombinasjon med silkastøv trenger lengere eksponeringstid for å utnytte sin virkningsgrad fullt ut. Nøyaktighet er også viktig aspekt ved forsøket og det bør stebes etter å bruke det rette utstyret slik at minst mulig avvik forekommer.

Forslag til viderestudie

Basert ut i fra erfaring med denne masteroppgaven som omhandler kloridinntrengning i betong vil jeg gjerne komme med noen forslag til viderearbeid.

- Gjennomføre i tillegg 10 % silikastøvmengde av klinkermengde på ellers samme betingelsene som i denne oppgaven
- Teste lengre eksponeringsalder på samme prøvene som angitt i forsøksmatrisen, slik at flygeaskeinnvirkningen blir tydelig i resultatene
- Utføre forsøk med lengre varmeherding for å aksellerer pozzolanreaksjonen ved høyere mengde flygeaske
- Samalingseffekt av flygeaske innlandet fra blandeverket i Anlegg FA sement sammenlignet med flygeaske tilsatt i Anleggsementen ved blanding.
- Flygeaskens finhet har også en effekt på kloridinntrengning. Teste Forsøksmatrisen med forskjellige typer flygeaske tilgjengelig.
- Feltforsøk sammenlignet med laboratorieforsøk.
- Sammenligne NT Build 443 med RCT metoden for å undersøke kloridinnhold på samme forsøksmatrisen

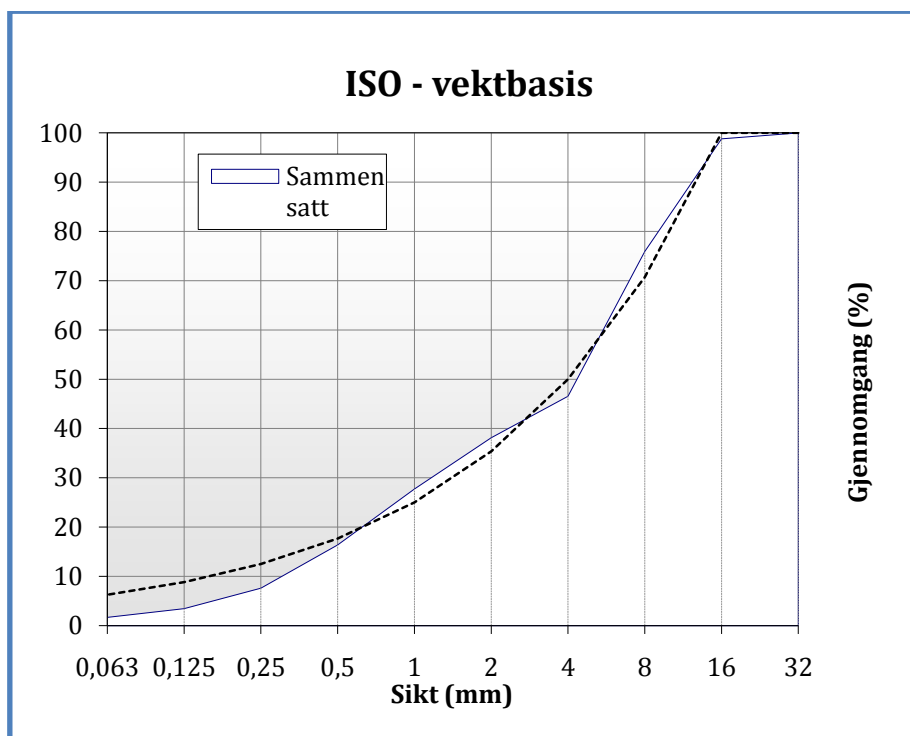
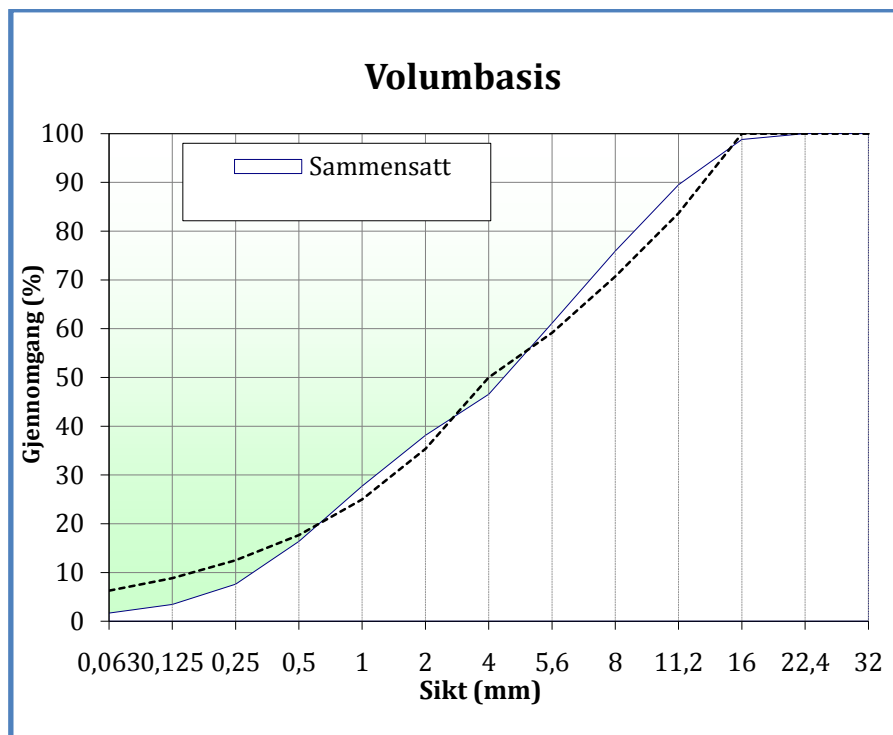
Referanser

- [1] Pål Gjerp, Morten Opsahl, Sverre Smeplass (2009, 2 utg): ”Grunnleggende Betongteknologi”
- [2] PIANC Norsk Havneingeniørforening (2009, 3 utg), bestandige betongkaier DEL 1: Anbefalte krav spesifikasjoner
- [3] PIANC Norsk Havneingeniørforening (2009, 3 utg), bestandige betongkaier DEL 2: Praktiske retningslinjer for bestandighetsprosjektering og kvalitets prosjektering og kvalitets kontroll av betongarbeider.
- [4] Sintef rapport i samarbeid med NTNU, Betong informasjonsdagen (2005)
- [5] Haram E (2006): Masteroppgave, “Bjørvikatunnelen – Beregning og kontroll av rissrisiko i herdefasen”, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU
- [6] www.HeidelbergCement.com
- [7] Donald Burden (2006), Mastertheises: “The durability of concrete containing high level of fly ash”, University of New Brunswick
- [8] Suvimol Sujjavanich, Voradej Sida, and Prasert Suwanvitaya (2005): “Chloride permeability and corrosion risk of High volume fly ash concrete with mid-range waterreducer”, ACI material journal
- [9] P.Kumar Mehta, University of California, Berkley, USA: “High-Performance, High-Volume flyash concrete for sustainable developmentvolume fly ash for sustainable development”, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.
- [10] Michael Thomas, University of New Brunswick (2007): “Optimizing the use of fly ash in concrete”
- [11] Morris Skip Huffman, “Use of Flyash in Concrete”, Reported by ACI Committee 232
- [12] K.D. Stanish, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada (1997): “Testing the Chloride penetration resistance”
- [13] Knut O Kjellsen, Ola Skjølsvold (2003), Rapport nr 4: ”Betong konstruksjoners livsløp kloridinntrengning i ressursvennelig kvalitetsbetong ”, Aktivitet DP1 A2
- [14] Statens Vegvesen Teknologirapport No. 2482, 2007
- [15] William Elkey, Erik J. Sellevold: Electrical resistivity, publications nr.80 (Staten Vegvesen) Norwegian Road Research Laboratory

- [16] Ueli Angst, NTNU (2010), Kritisk Klorid innhold i Betong, Betongrehabiliteringsdagene 15-17 mars, Oslo
- [18] Claus K Larsen, Ian Willoughby, Reidar Kompen (2004) Bjørvika senketunell trinn 1: Laboratorieresultater. Oppdrag A-35A rapp.nr1 revisjon 1. Statens Vegvesen, VegdirektoratetTehnologiavdelingen
- [19] Herdeteknologi, Norcem: http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FECC97E1-A475-4324-8074-6A3D4A10C082/0/Herdningsteknologi_net.pdf
- [20] Fagbok: Concrete Technology 1(2009), TKT 4215, Norwegian University of Science and Technology
- [21] Sverre Smeplass, Øyvind Bjøntegaard, Reidar Kompen, Eirik Haram (2005) Teknologirapport nr 2580."Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase", Statens Vegvesen
- [22] Fagbok: (2004) Betongboka ,Norcem 2utgave
- [23] Tuutti, K.: "Corrosion of Steel in Concrete." CBI-report Fo-4, Stockholm 1982. (Det er Kyösti Tuutti si doktoravhandling frå 1982
- [24] [http://www.havn.oslo.kommune.no/getfile.php/oslo%20havn%20kf%20\(HAV\)/Internett%20\(HAV\)/Bilder/element_ill01_300%20MTIxNjc5NDQ3NTEwODI3NTcwMj.jpg](http://www.havn.oslo.kommune.no/getfile.php/oslo%20havn%20kf%20(HAV)/Internett%20(HAV)/Bilder/element_ill01_300%20MTIxNjc5NDQ3NTEwODI3NTcwMj.jpg)
- [25] Gro Markseth (2008), "Levetidsprosjektering av betongkonstruksjoner i marint miljø", COIN
- [26] Anleggsement: http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/BA1AE3BD-886D-41F3-B93C-FA556DAC8DC7/0/anleggsement_endretdes10.pdf
- [27] Anlegg FA-sement: http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/021458B5-E38E-41D5-B900-97F3EFBE9221/0/ProduktarkAnleggFA_rettetdes10.pdf

Vedlegg

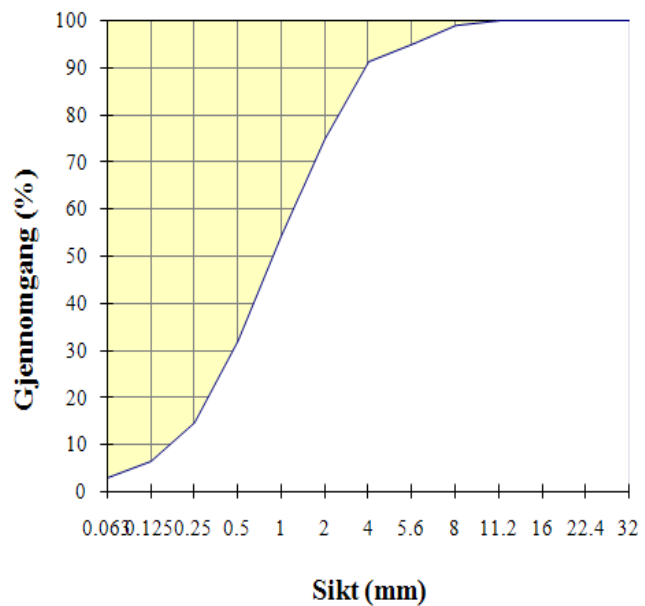
Vedlegg A - Korngradering



Fraksjon I

Type:	Forsand 0-5 mm
Dato:	07/02/2011
FM =	2.80

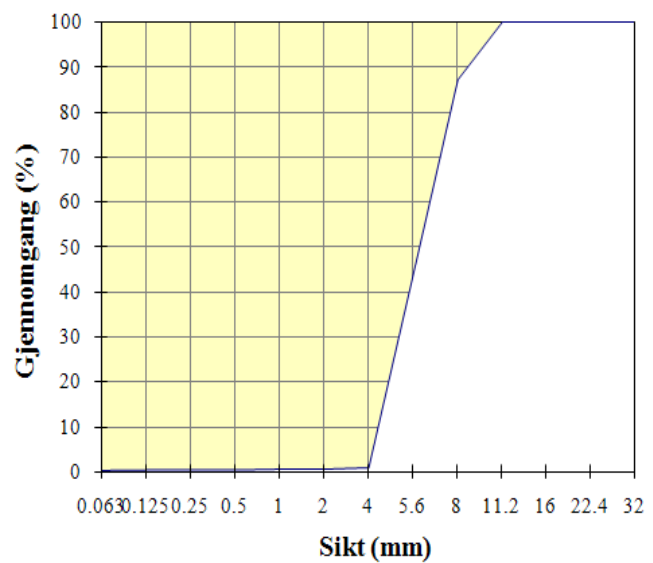
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0.0	100.0
22.4	0	0	0.0	100.0
16	0	0	0.0	100.0
11.2	0	0	0.0	100.0
8	1	1	1.0	99.0
5.6	5	5	5.0	95.0
4	8.7	8.7	8.7	91.3
2	25	25	25.0	75.0
1	45.5	45.5	45.5	54.5
0.5	67.9	67.9	67.9	32.1
0.25	85.3	85.3	85.3	14.7
0.125	93.5	93.5	93.5	6.5
0.063	97.0	97.0	97.0	3.0
Bunn	100	100		



Fraksjon II

Type:	Forsand 5-8 mm
Dato:	07/02/2011
FM =	5.59

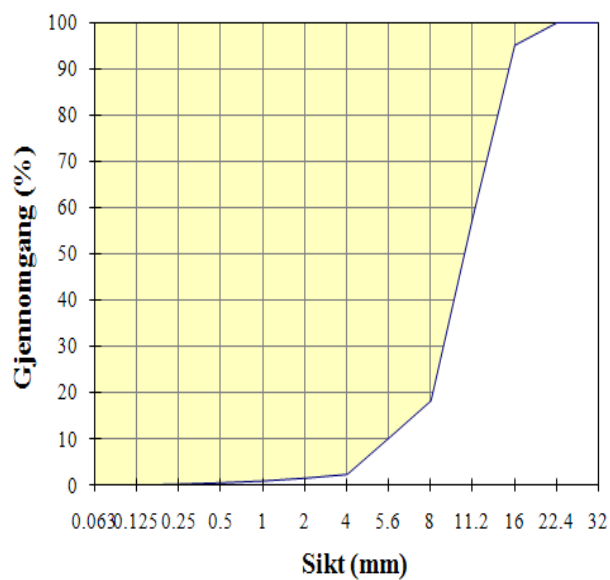
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0.0	100.0
22.4	0	0	0.0	100.0
16	0	0	0.0	100.0
11.2	0	0	0.0	100.0
8	12.8	12.8	12.8	87.2
5.6	56	56	56.0	44.0
4	99	99	99.0	1.0
2	99.3	99.3	99.3	0.7
1	99.3	99.3	99.3	0.7
0.5	99.5	99.5	99.5	0.5
0.25	99.5	99.5	99.5	0.5
0.125	99.5	99.5	99.5	0.5
0.063	99.6	99.6	99.6	0.4
Bunn	100	100		



Fraksjon III

Type:	Forsand 8-16 mm
Dato:	07/02/2011
FM =	6.29

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0.0	100.0
22.4	0	0	0.0	100.0
16	4.8	4.8	4.8	95.2
11.2	41.9	41.9	41.9	58.1
8	81.5	81.5	81.5	18.5
5.6	89.5	89.5	89.5	10.5
4	97.4	97.4	97.4	2.6
2	98.2	98.2	98.2	1.8
1	98.8	98.8	98.8	1.2
0.5	99.2	99.2	99.2	0.8
0.25	99.5	99.5	99.5	0.5
0.125	99.7	99.7	99.7	0.3
0.063	99.7	99.7	99.7	0.3
Bunn	100	100		



Vedlegg B - Betong resepter

Prosj./id.: Ali-master Resept AN-FA 1					
Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	403,0	14,105			14,105
Elkem Silikastøv	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flygeaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	161,2	5,642		-1,856	3,786
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	5,0	1,603	33,663
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	1,0	0,160	16,190
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	3,2	0,113	82	0,093	0,113
	0,0	0,000	90	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

4,107

Prosj./id.:	Ali-master Resept AN-FA 2
-------------	---------------------------

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	317,7	12,709			12,709	
Elkem Silikastøv	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Flygeaske	73,4	2,936	0	0,000	2,936	
Fritt vann	156,5	6,258		-0,858	5,400	5,766
Absorbert vann	9,2	0,366			0,366	
Forsand 0-5 mm	916,0	36,640	2,0	0,733	37,373	
Forsand 5-8 mm	458,0	18,320	0,0	0,000	18,320	
Forsand 8-16 mm	458,0	18,320	0,2	0,042	18,362	
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	2,5	0,102	82	0,083	0,102	
	0,0	0,000	90	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Prosj./id.:	Ali-master Resept AN-FA 3
-------------	---------------------------

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	237,5	9,499			9,499	
Elkem Silikastøv	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Flygeaske	142,5	5,699	0	0,000	5,699	
Fritt vann	152,0	6,079		-0,837	5,242	5,608
Absorbert vann	9,2	0,366			0,366	
Forsand 0-5 mm	916,0	36,640	2,0	0,733	37,373	
Forsand 5-8 mm	458,0	18,320	0,0	0,000	18,320	
Forsand 8-16 mm	458,0	18,320	0,2	0,042	18,362	
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	1,9	0,076	82	0,062	0,076	
	0,0	0,000	90	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Prosj./id.:

Ali-master Resept AN-FA 4

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	377,2	15,088			15,088
Elkem Silikastøv	15,1	0,604	0	0,000	0,604
Flygeaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	163,0	6,518		-1,614	4,905
Absorbert vann	9,2	0,366			0,366
Forsand 0-5 mm	916,0	36,640	3,6	1,319	37,959
Forsand 5-8 mm	458,0	18,320	0,0	0,000	18,320
Forsand 8-16 mm	458,0	18,320	1,0	0,183	18,503
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	3,4	0,136	82	0,111	0,136
	0,0	0,000	90	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

5,271

Prosj./id.: Ali-master Resept AN-FA 5

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	304,4	10,655			10,655
Elkem Silikastøv	9,9	0,346	0	0,000	0,346
Flygeaske	70,3	2,461	0	0,000	2,461
Fritt vann	157,8	5,524		-1,144	4,380
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	3,1	0,994	33,054
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	0,5	0,080	16,110
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	2,4	0,085	82	0,070	0,085
	0,0	0,000	90	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

4,700

Prosj./id.:

Ali-master Resept AN-FA 6

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	231,6	8,108			8,108	
Elkem Silikastøv	5,8	0,203	0	0,000	0,203	
Flygeaske	139,0	4,865	0	0,000	4,865	
Fritt vann	152,9	5,351		-1,127	4,224	4,544
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321	
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	3,1	0,994	33,054	
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030	
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	0,5	0,080	16,110	
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	1,9	0,065	82	0,053	0,065	
	0,0	0,000	90	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Prosj./id.: Ali-master Resept AN-1

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	301,4	10,550			10,550
Elkem Silikastøv	12,1	0,422	0	0,000	0,422
Flygeaske	75,4	2,638	0	0,000	2,638
Fritt vann	160,4	5,613		-0,779	4,833
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	2,1	0,673	32,733
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	0,2	0,037	16,067
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	2,4	0,084	82	0,069	0,084
	0,0	0,000	90	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

5,154

Prosj./id.:

Ali-master Resept AN-2

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	243,5	8,521			8,521	
Elkem Silikastøv	7,9	0,277	0	0,000	0,277	
Flygeaske	130,3	4,559	0	0,000	4,559	
Fritt vann	155,8	5,454		-0,766	4,688	5,008
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321	
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	2,1	0,673	32,733	
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030	
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	0,2	0,037	16,067	
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	1,9	0,068	82	0,056	0,068	
	0,0	0,000	90	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Prosj./id.:	Ali-master Resept AN-3
-------------	------------------------

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	251,9	8,817			8,817	
Elkem Silikastøv	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Flygeaske	134,8	4,717	0	0,000	4,717	
Fritt vann	154,7	5,413		-0,768	4,645	4,966
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321	
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	2,1	0,673	32,733	
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030	
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	0,2	0,037	16,067	
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	2,0	0,071	82	0,058	0,071	
	0,0	0,000	90	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Prosj./id.:

Ali-master Resept AN-4

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg FA	184,6	6,462			6,462	
Elkem Silikastøv	4,6	0,162	0	0,000	0,162	
Flygeaske	184,6	6,462	0	0,000	6,462	
Fritt vann	151,4	5,299		-0,892	4,407	4,728
Absorbert vann	9,2	0,321			0,321	
Forsand 0-5 mm	916,0	32,060	2,5	0,802	32,862	
Forsand 5-8 mm	458,0	16,030	0,0	0,000	16,030	
Forsand 8-16 mm	458,0	16,030	0,3	0,048	16,078	
Forsand 11-16 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	1,5	0,052	82	0,042	0,052	
	0,0	0,000	90	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

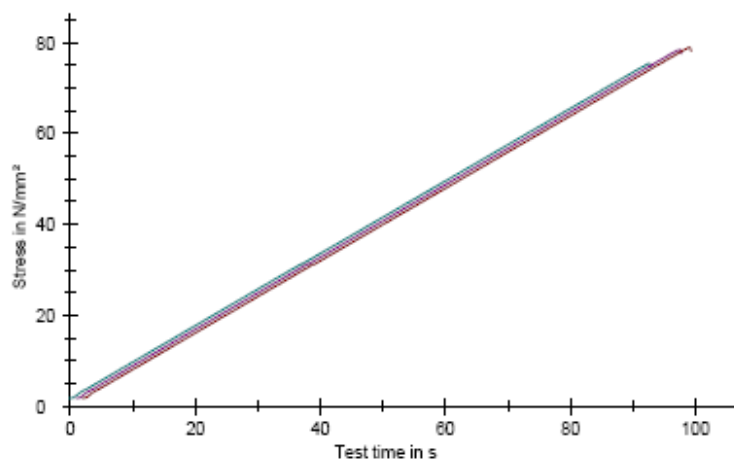
Vedlegg C - Trykktest Anlegg sement

Resultater:

AN-1

Nr	ID	F_m kN	c_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
23	AN-1	753,87	75,39	100,0	100,0	100,0
24	AN-1	784,18	78,42	100,0	100,0	100,0
25	AN-1	789,59	78,96	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

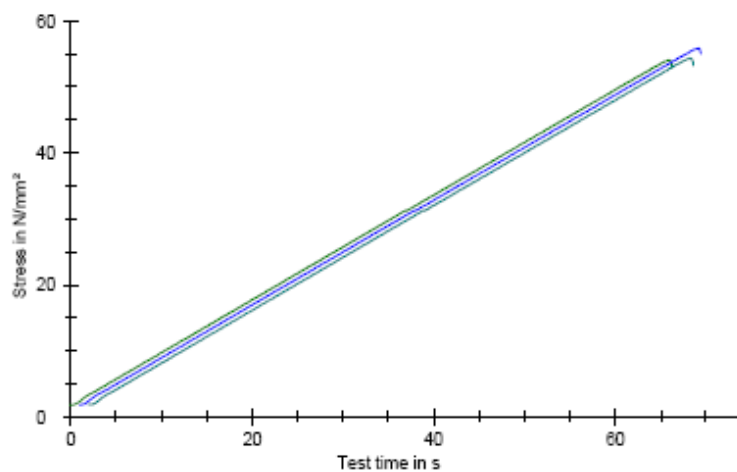


Resultater:

AN-2

Nr	ID	F_m kN	c_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
26	AN-2	540,41	54,04	100,0	100,0	100,0
27	AN-2	558,13	55,81	100,0	100,0	100,0
28	AN-2	543,24	54,32	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

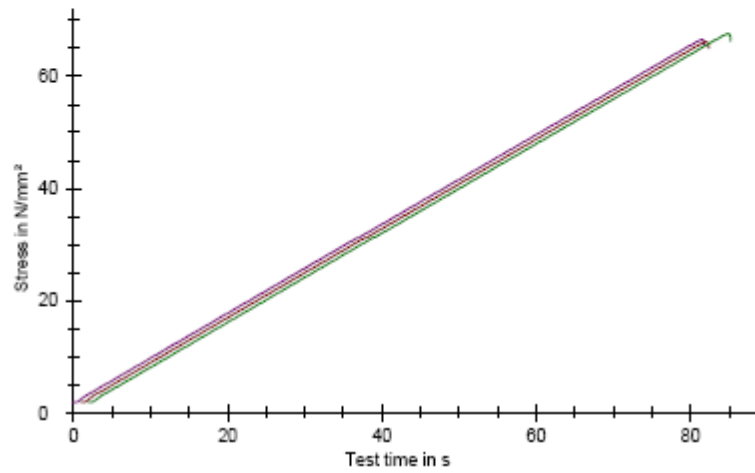


Resultater:

AN-3

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
29	AN-3	665,50	66,55	100,0	100,0	100,0
31	AN-3	661,97	66,20	100,0	100,0	100,0
32	AN-3	676,00	67,60	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

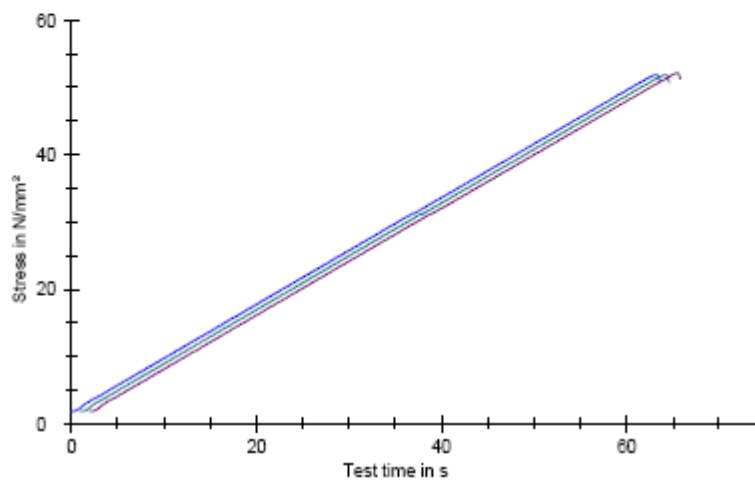


Resultater:

AN-4

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
33	AN-4	518,79	51,88	100,0	100,0	100,0
34	AN-4	519,01	51,90	100,0	100,0	100,0
35	AN-4	521,41	52,14	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:



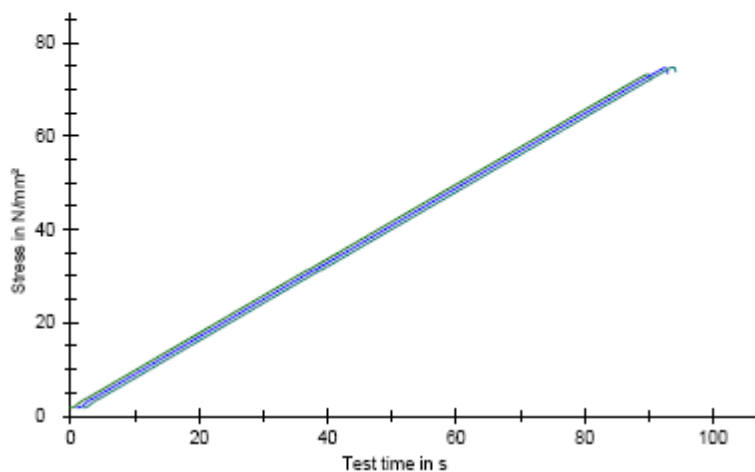
Vedlegg D – Trykktest Anlegg FA sement

Resultater:

AN-FA 1

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
11	AN-FA 1	732,11	73,21	100,0	100,0	100,0
12	AN-FA 1	745,51	74,55	100,0	100,0	100,0
13	AN-FA 1	747,41	74,74	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

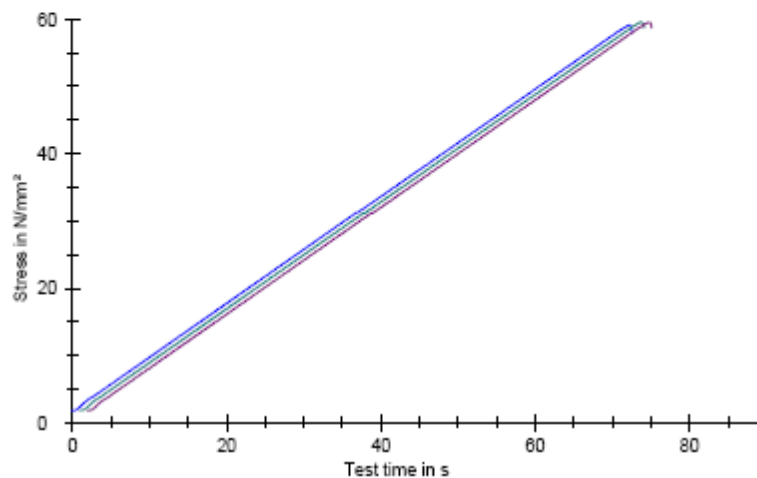


Resultater:

AN-FA 2

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
17	AN-FA 2	591,10	59,11	100,0	100,0	100,0
18	AN-FA 2	595,65	59,56	100,0	100,0	100,0
19	AN-FA 2	595,43	59,54	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

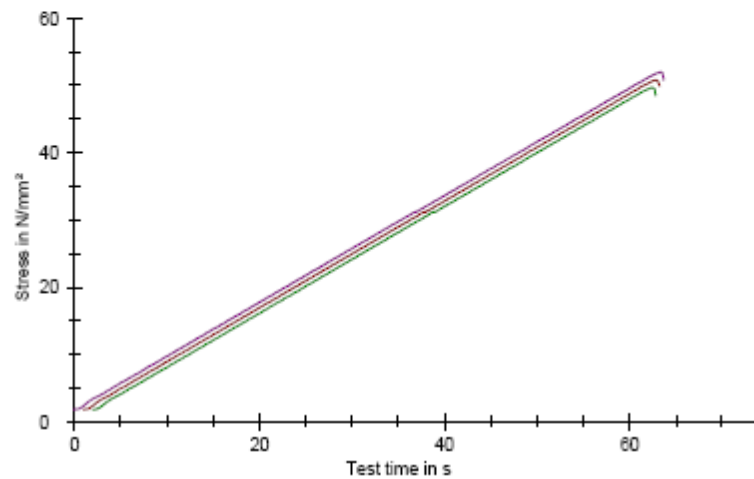


Resultater:

AN-FA 3

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
14	AN-FA 3	519,85	51,99	100,0	100,0	100,0
15	AN-FA 3	507,96	50,80	100,0	100,0	100,0
16	AN-FA 3	496,63	49,66	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

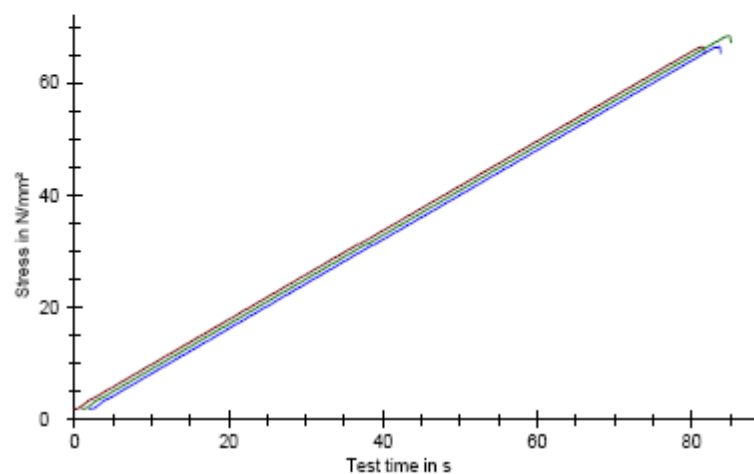


Resultater:

AN-FA 4

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
3	AN-FA 4	664,22	66,42	100,0	100,0	100,0
4	AN-FA 4	683,85	68,38	100,0	100,0	100,0
5	AN-FA 4	664,46	66,46	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

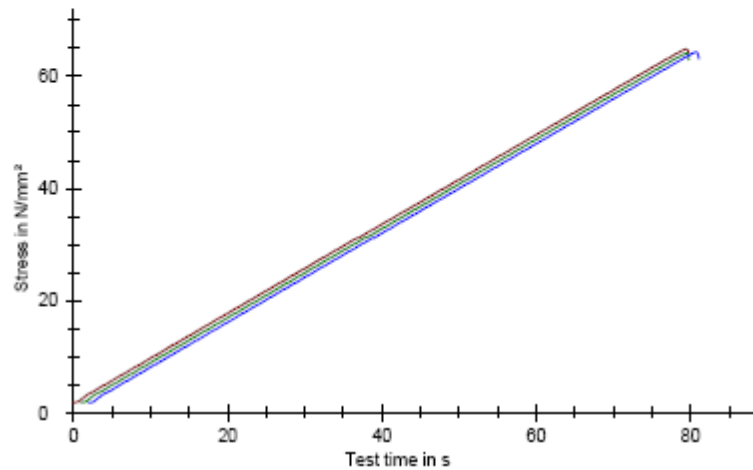


Resultater:

AN-FA 5

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
20	AN-FA 5	648,85	64,89	100,0	100,0	100,0
21	AN-FA 5	640,97	64,10	100,0	100,0	100,0
22	AN-FA 5	643,11	64,31	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

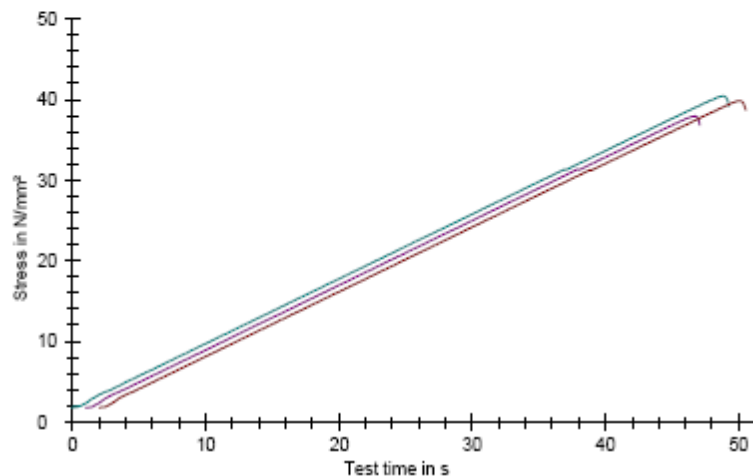


Resultater:

AN-FA 6

Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
8	AN-FA 6	403,97	40,40	100,0	100,0	100,0
9	AN-FA 6	379,00	37,90	100,0	100,0	100,0
10	AN-FA 6	398,11	39,81	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:

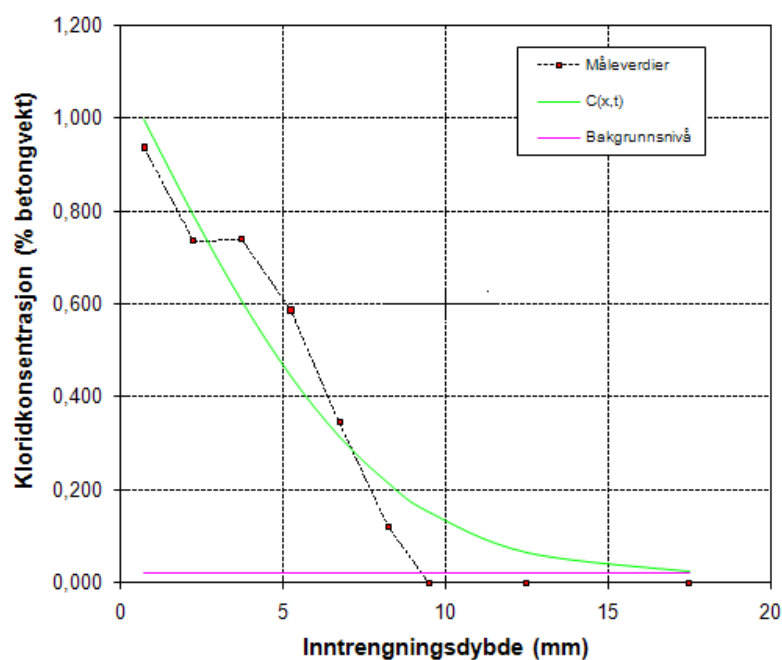


Vedlegg E – Kloridprofiler etter 35 døgns eksponering

Beregning av C_0 og D Prosjekt: AN-FA 1 Profil : 35 døgns eksp

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	1,103	% betong
D	6,26	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9317	
Inntrengning k (0,1 %)	133,5	g/m^2
	35,5	mm

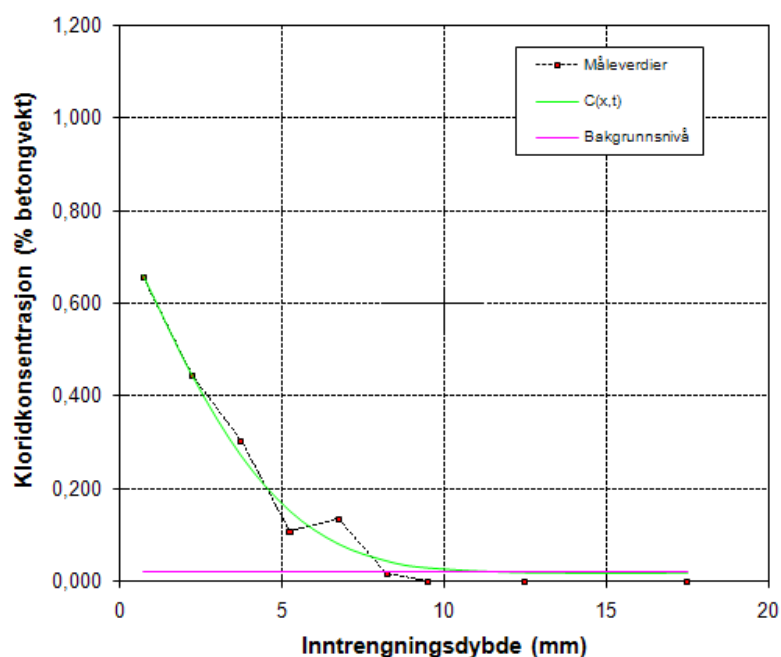
x	målt	status
0,75	0,937	ok
2,25	0,736	ok
3,75	0,740	ok
5,25	0,587	ok
6,75	0,345	ok
8,25	0,121	ok
9,5	0,000	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D Prosjekt: AN-FA 2 Profil : 35 døgns eksp

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	0,775	% betong
D	2,50	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9832	
Inntrengning k (0,1 %)	63,1	g/m^2
	20,3	mm

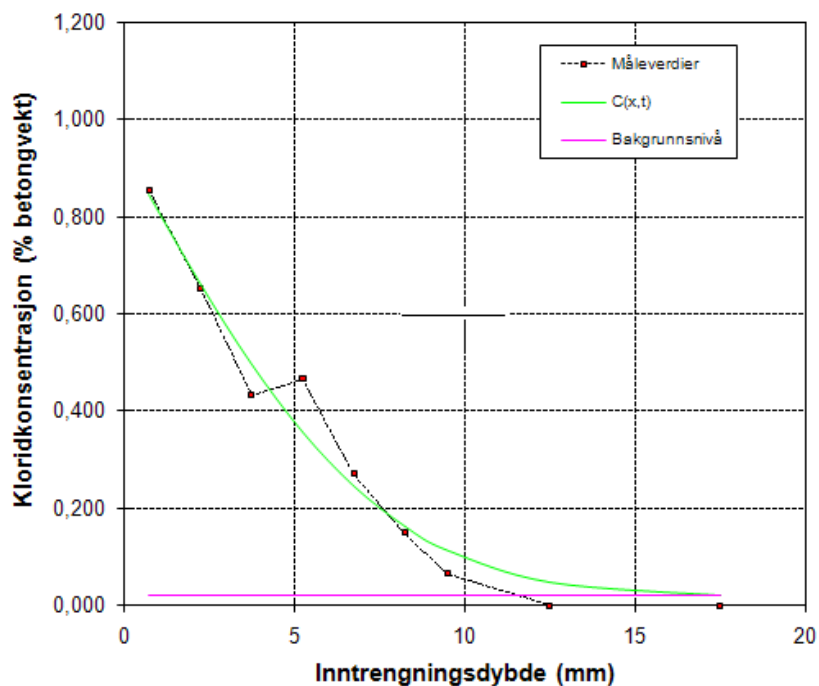
x	målt	status
0,75	0,656	ok
2,25	0,443	ok
3,75	0,303	ok
5,25	0,107	ok
6,75	0,134	ok
8,25	0,017	ok
9,5	0,000	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D	Prosjekt: AN-FA 3	Profil : 35 døgns eksp
--	--------------------------	-------------------------------

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_i	0,942	% betong
D	5,62	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9714	
Inntrengning k (0.1 %)	114.1	g/m^2
	32.2	mm

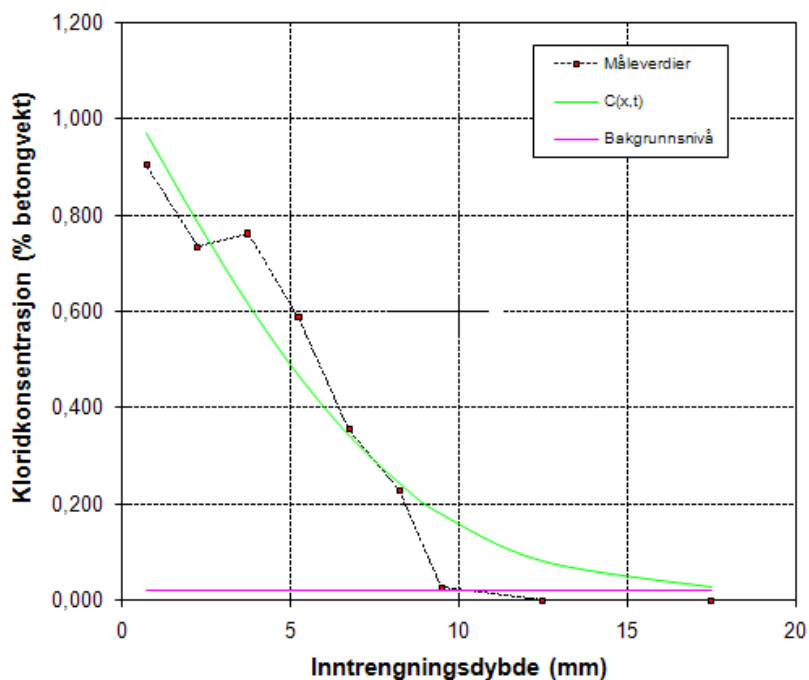
x	målt	status
0,75	0,855	ok
2,25	0,652	ok
3,75	0,433	ok
5,25	0,467	ok
6,75	0,271	ok
8,25	0,150	ok
9,5	0,066	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D	Prosjekt: AN-FA 4.2	Profil : 35 døgns eksp
--	----------------------------	-------------------------------

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_i	1,067	% betong
D	7,31	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9331	
Inntrengning k (0.1 %)	139.2	g/m^2
	38,0	mm

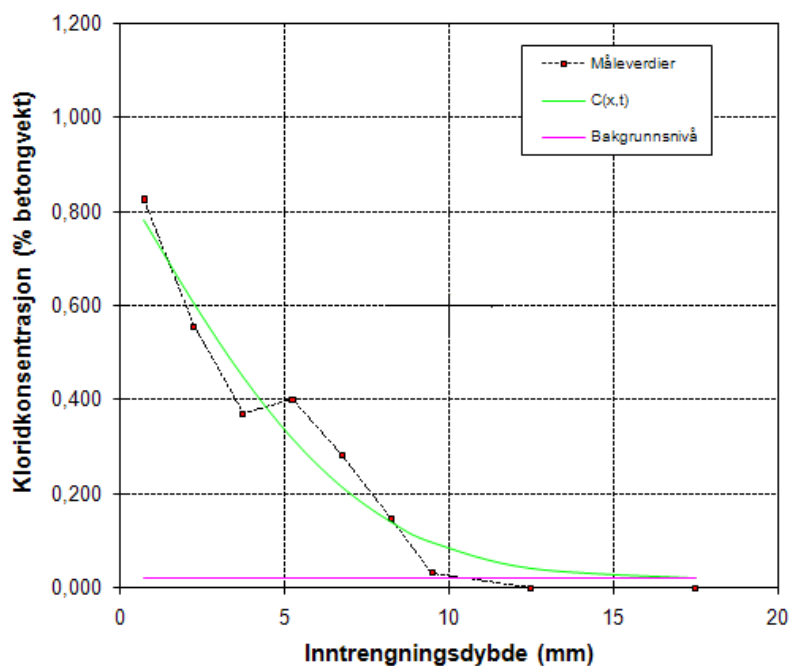
x	målt	status
0,75	0,904	ok
2,25	0,734	ok
3,75	0,762	ok
5,25	0,588	ok
6,75	0,355	ok
8,25	0,229	ok
9,5	0,026	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D Prosjekt: AN-FA 4.3 Profil : 35 døgn eksp

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	0,873	% betong
D	5,22	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9561	
Inntrengning k (0.1 %)	102,2	g/m^2
	30,4	mm

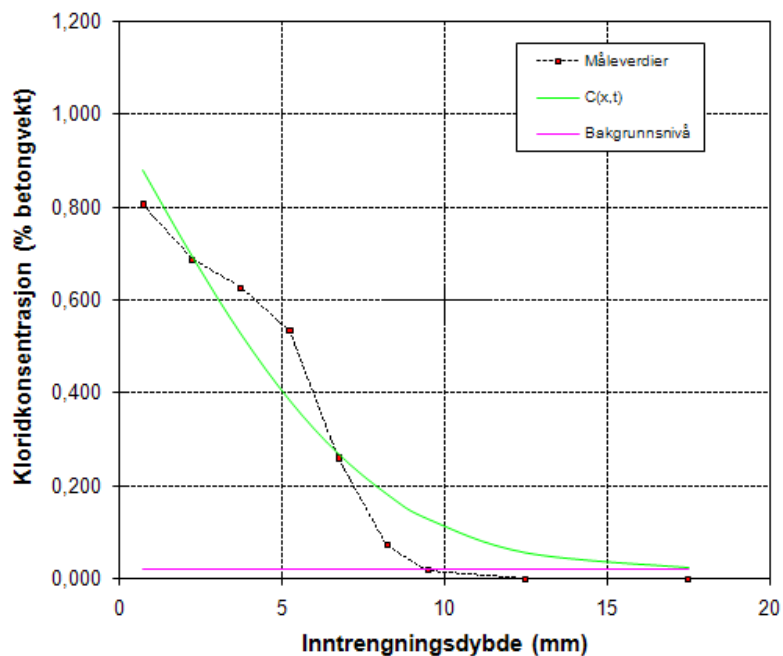
x	målt	status
0,75	0,826	ok
2,25	0,555	ok
3,75	0,370	ok
5,25	0,400	ok
6,75	0,282	ok
8,25	0,148	ok
9,5	0,032	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D Prosjekt: AN-FA 5.2 Profil : 35 døgn eksp

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	0,976	% betong
D	5,95	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9314	
Inntrengning k (0.1 %)	115,0	g/m^2
	33,5	mm

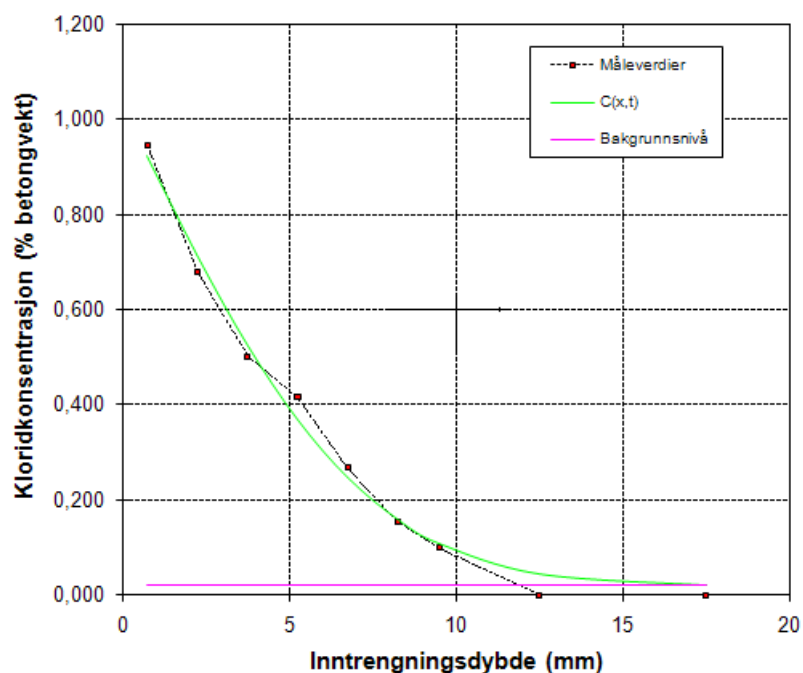
x	målt	status
0,75	0,806	ok
2,25	0,687	ok
3,75	0,626	ok
5,25	0,534	ok
6,75	0,260	ok
8,25	0,073	ok
9,5	0,019	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D **Prosjekt: AN-FA 5.3** **Profil : 35 døgn eksp**

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_i	1,033	% betong
D	5,13	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9920	
Inntrengning	123,2	g/m^2
k (0.1 %)	31,6	mm

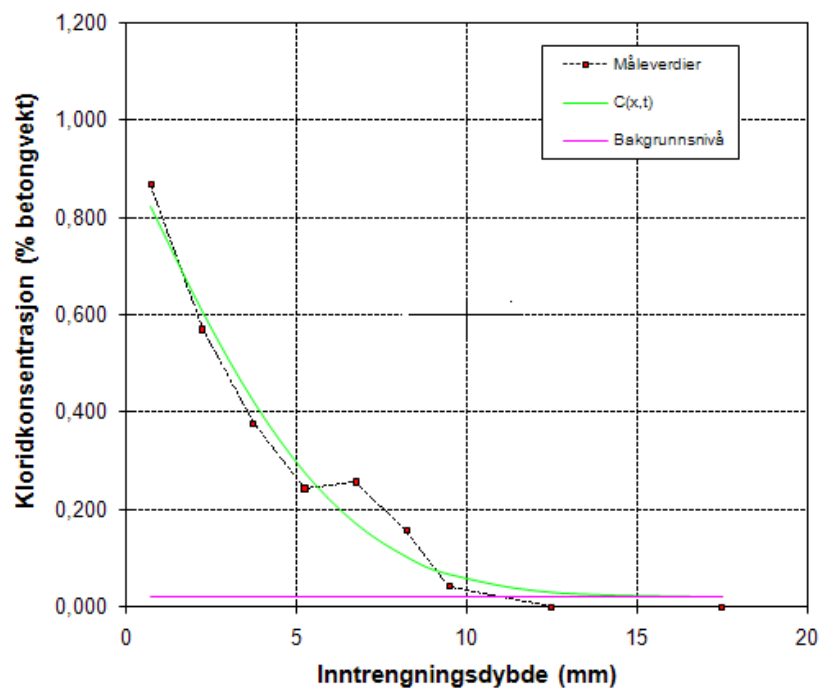
x	målt	status
0,75	0,946	ok
2,25	0,679	ok
3,75	0,502	ok
5,25	0,416	ok
6,75	0,268	ok
8,25	0,155	ok
9,5	0,099	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D **Prosjekt: AN-FA 6.2** **Profil : 35 døgn eksp**

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_i	0,936	% betong
D	3,92	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9717	
Inntrengning	99,8	g/m^2
k (0.1 %)	26,9	mm

x	målt	status
0,75	0,867	ok
2,25	0,570	ok
3,75	0,377	ok
5,25	0,243	ok
6,75	0,257	ok
8,25	0,157	ok
9,5	0,042	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



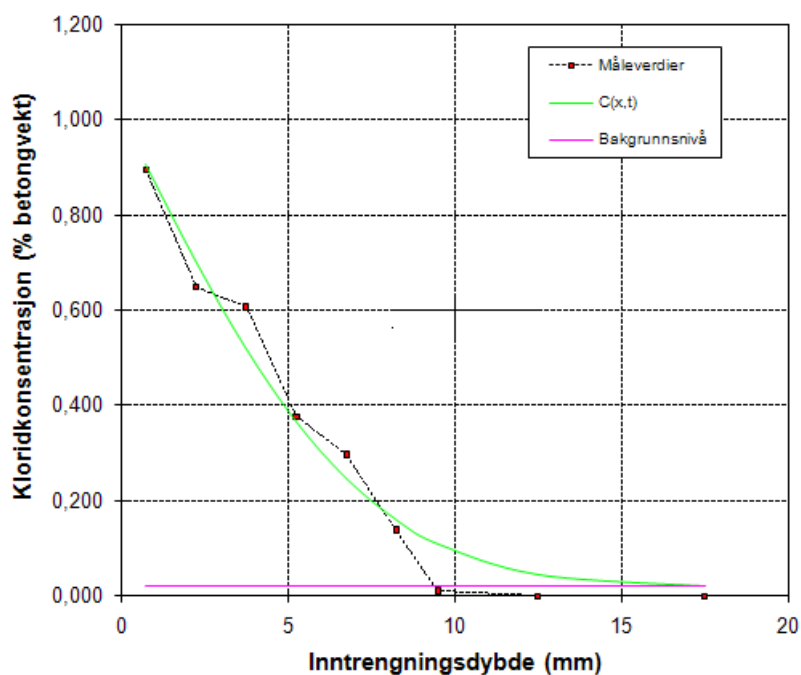
Beregning av C_0 og D

Prosjekt: AN-1

Profil : 35 døgn eksp

Eksponert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	1,011	% betong
D	5,22	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9730	
Inntrengning	115,7	g/m^2
k (0.1 %)	31,7	mm

x	målt	status
0,75	0,896	ok
2,25	0,649	ok
3,75	0,607	ok
5,25	0,377	ok
6,75	0,297	ok
8,25	0,139	ok
9,5	0,011	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok

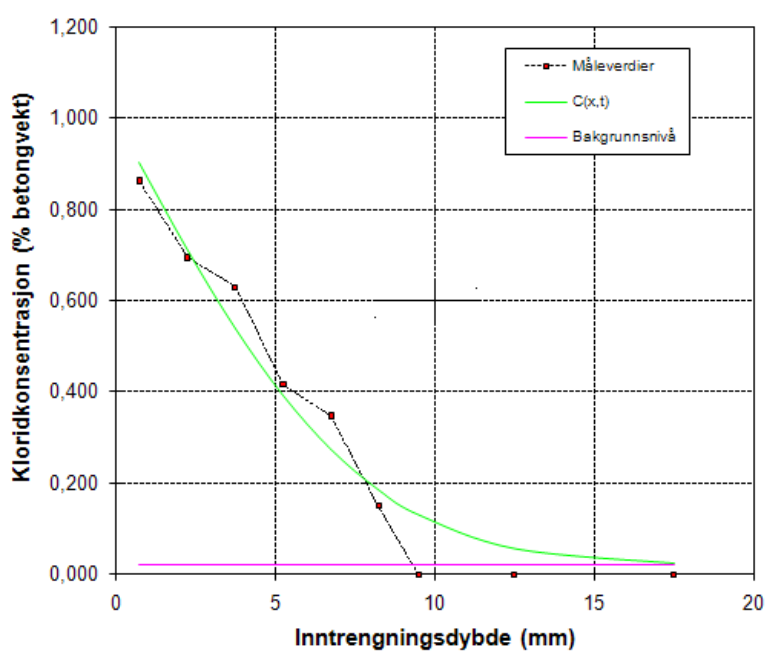

Beregning av C_0 og D

Prosjekt: AN-2

Profil : 35 døgn eksp

Eksponert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	1,004	% betong
D	5,90	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9612	
Inntrengning	119,2	g/m^2
k (0.1 %)	33,6	mm

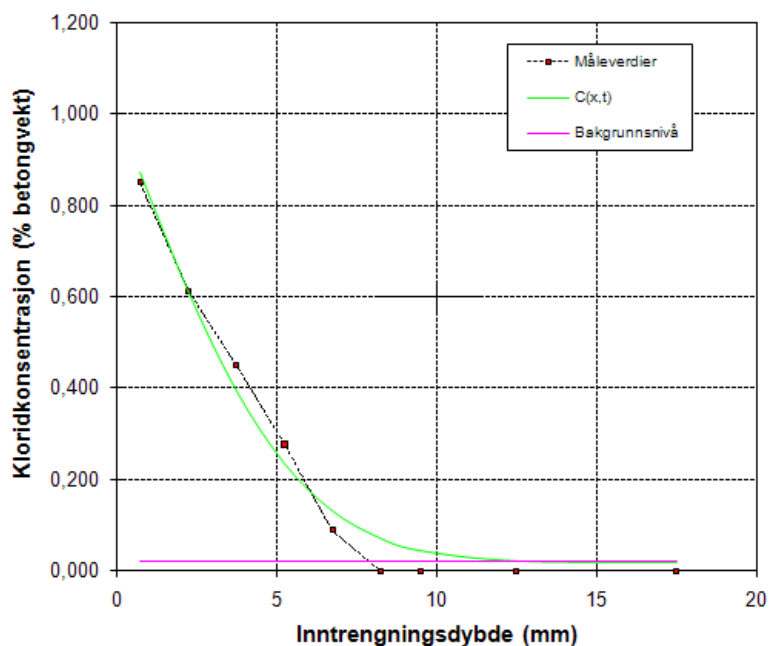
x	målt	status
0,75	0,863	ok
2,25	0,695	ok
3,75	0,630	ok
5,25	0,416	ok
6,75	0,348	ok
8,25	0,150	ok
9,5	0,000	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D	Prosjekt: AN-3	Profil : 35 døgn eksp
---	-----------------------	------------------------------

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	1,010	% betong
D	3,01	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9855	
Inntrengning	88,8	g/m^2
k (0.1 %)	24,2	mm

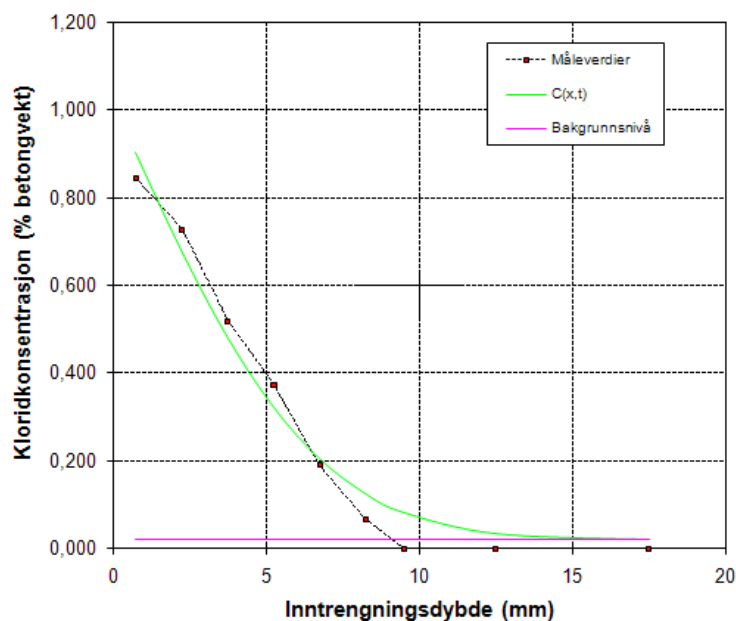
x	målt	status
0,75	0,851	ok
2,25	0,611	ok
3,75	0,450	ok
5,25	0,277	ok
6,75	0,089	ok
8,25	0,000	ok
9,5	0,000	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Beregning av C_0 og D	Prosjekt: AN-4	Profil : 35 døgn eksp
---	-----------------------	------------------------------

Ekspontert tid	840	timer
Bakgrunn	0,020	% betong
C_s	1,020	% betong
D	4,28	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0,9793	
Inntrengning	105,0	g/m^2
k (0.1 %)	33,5	mm

x	målt	status
0,75	0,845	ok
2,25	0,727	ok
3,75	0,519	ok
5,25	0,374	ok
6,75	0,191	ok
8,25	0,067	ok
9,5	0,000	ok
12,5	0,000	ok
17,5	0,000	ok



Vedlegg F - Bestemmelse av elektrisk motsandsevne

SINTEF Byggeforsk Betong og natursteinlaboratoriene	KS 14-05-04-128 Herdnet betong. Bestemmelse av elektrisk motstandsevne	Gradering Intern	Side 1 av 1
Utarbeidet av Ola Skjølsvold	Godkjent av Per Arne Dahl	Versjon 1	Gyldig fra 2007-09-20

1 Utstyr

- Escort multimeter (2 stk ledninger med klemme)
- 2 stk 10/100/100 mm stålplater med sentrisk plassert 8 mm skrue
- elektrisk ledende gel (ultralud-gel)

2 Prøvestykker

Måling kan utføres på alle prøvestykker med areal mindre eller lik 100 x 100 mm. Prøvestykkene skal være kapillært vannmettet (ikke trykkmettet). Anleggsflatene skal være planparallelle og plane uten grader (ikke nødvendigvis planslipete; sagflater og støpehudflater er vanligvis godt nok).

3 Prosedyre

Prøvingen utføres vanligvis ved 20°C. Både prøver (i vann) og utstyr må være oppbevart ved 20°C i min 24 timer før prøving. I enkelte tilfeller vil det kreves lengre akklimatisering for prøvene. Temperatur i vannet og rommet ved prøving skal journalføres.

Multimeteret innstilles på 1 kHz og motstandsmåling (R). Kontroller at displayet viser "1 kHz" og "Ω". Den ene stålplata legges på to trebiter eller lignende slik at den ligger stødig, og uten at ledningsklemmer og skruer kommer i klem. Det smøres ett lag med gel på begge stålplatene. Stålplatene presses fast mot hverandre og det kontrolleres at motstanden i kretsen er neglisjerbar (dvs. ca 0,1-0,3 Ω).

Prøvestykkene tas opp ett og ett fra vannbad like før måling utføres. Overflatene tørkes godt med fuktet klut (*pass på at overflatene blir overflatetørre*). Deretter smøres et lag med gel (ikke tykt, men rikelig) på begge anleggsflater (det må *ikke* smøres gel på andre flater). Prøvestykket legges ned på den underste stålplata, og den andre stålplata legges oppå og presses fast ned mot prøvestykket. *Det presses motsentrum av stålplata (stålskruen), og ikke mot stålplatas kanter.* Trykket slippes opp noen sekunder til displayet stabiliserer seg. Prosedyren gjentas. Dersom det oppnås omtrentlig samme verdi noteres siste måling som resultat. Dersom det oppnås helt forskjellige verdier må det letes etter feilkilder (grader, for lite/mye gel osv). Dersom det skal utføres flere målinger på samme prøvestykke, *må gelen tørkes godt av de sidene som ikke er anleggsflater.*

Etter avlesning av motstand tørkes gelen av flatene, og det foretas måling av anleggsflatenes areal (A) og innbyrdes avstand (L).

Resultatet beregnes som $R = \text{avlest motstand} : A / L (\Omega m)$

Vedlegg G– Bestemmelse av kloriddiffusjonskoeffisienten

1 Formål og bruksområde

Denne prosedyren beskriver en metode for å bestemme kloriddiffusjonskoeffisienten for herdnet betong eller andre sementbaserte materialer.

2 Referanser

- /1/ AEClaboratory: "Concrete testing. Hardened concrete. Chloride penetration. APM 302", 2nd edition, May 1991.
- /2/ NS 3671
- /3/ Intern prosedyre KS 14-05-04-108

3 Kort beskrivelse av prøvingsmetoden

Endeflaten på en vannmettet prøvesylinder eksponeres i en ~ 15 % NaCl-løsning i min 35 døgn. Etter ønsket eksponeringstid måles kloridinnholdet i 1 mm tykke sjikt, parallellt med eksponeringsflata. Det opprinnelige kloridinnholdet i betongen måles også. Kloriddiffusjonskoeffisienten (D_{Cl}) og kloridinnholdet i overflaten (C_0) beregnes etter Ficks 2. lov, som beskriver sammenhengen mellom målt kloridinnhold (C_x), avstanden fra eksponert overflate (x), og eksponeringstiden (t). Dessuten beregnes inntrengingshastigheten, v_i , som representerer total mengde inntrengte klorider dividert med areal og eksponeringstid. Kloridprofiler for de eksponerte prøvelegemer framstilles.

4 Kjemikalier og utstyr

- Destillert eller deionisert vann
- Kalsiumhydroksyd ($Ca(OH)_2$), p.a. kvalitet
- Natriumklorid (NaCl), p.a. kvalitet
- Epoksy
- Vannkjølt diamantsag
- Vekt, nøyaktighet bedre enn $\pm 0,01$ g.
- Termometer, nøyaktighet bedre enn ± 1 °C.
- Kar for vannmetning av prøvelegemer
- Utstyr til avfresing og oppsamling av betongstøv fra 1 mm betongsjikt
- Utstyr til nedknusing av betong
- Kar for eksponering av prøvelegemer i NaCl - løsning
- Salimeter for kontroll av NaCl-løsning

- Spektrofotometer for analyse av kloridinnhold i betongstøv

5 Forbehandling

Dokumentasjon av forbehandling føres på eget skjema som vist i Vedlegg 1.

5.1 Tildanning av prøvelegemer

Metoden utføres på utstøpte sylindere eller utborede kjerner, med minimum dimensjoner $d \times h = \varnothing 75 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$.

For at det skal kunne tildannes to prøvelegemer fra samme sylinder/kjerne skal denne sylinder/kjerne ha minimum høyde 200 mm.

Prøvene skal være representative for det materiale/den konstruksjon som skal undersøkes, og de må være fri for synlige riss, hulrom eller andre skader.

Innsendte prøver eller utstøpte sylindere/terninger skal ha en alder på minimum 12 uker. Utstøpte sylindere vannlagres fram til prøving.

Dersom man benytter en kjerne utboret fra utstøpt plate, så skal først de ytterste ca 70 mm av kjernen skjæres av. Av denne delen skal så de ytterste 10 mm skjæres av. Den sist dannede skjærflata utgjør eksponeringsflata. Se fig 1.

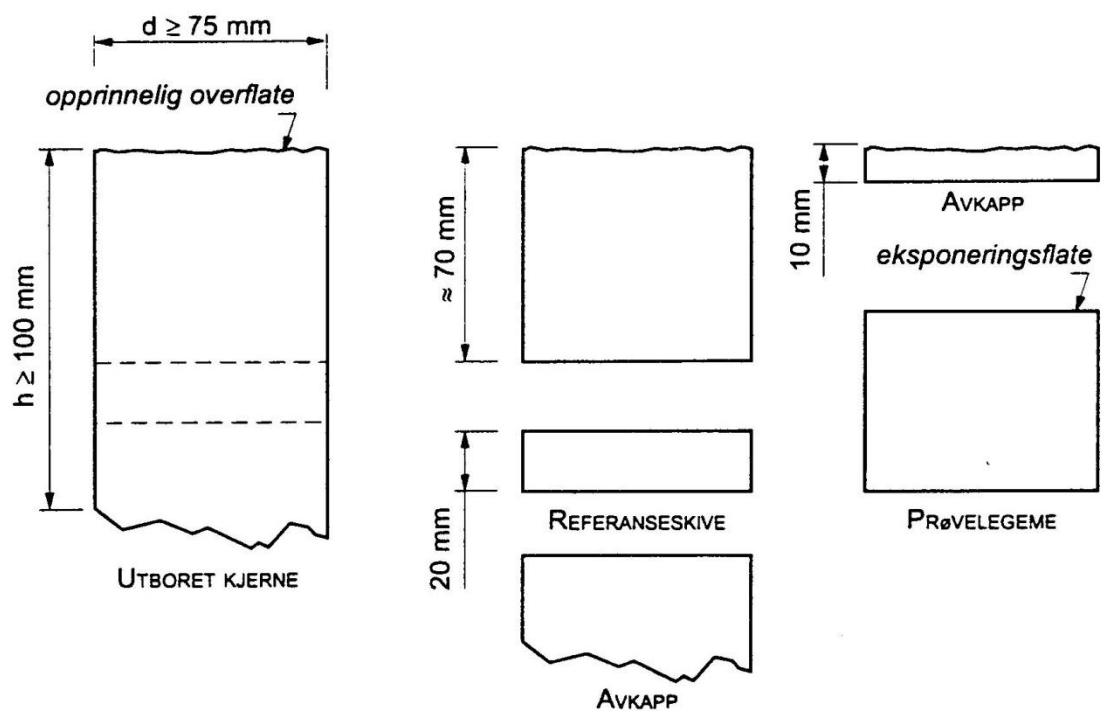
Dersom man benytter en kjerne utboret fra en eksisterende konstruksjon, skal tildanning av prøvelegemer vurderes i hvert enkelt tilfelle og ta hensyn til kjernens naturlige kloridprofil.

Dersom man benytter en utstøpt sylinder med høyde $< 200 \text{ mm}$, så skal denne deles i to halvdeler. Den ene halvdelens skjærflate utgjør eksponeringsflata. Se fig 2.

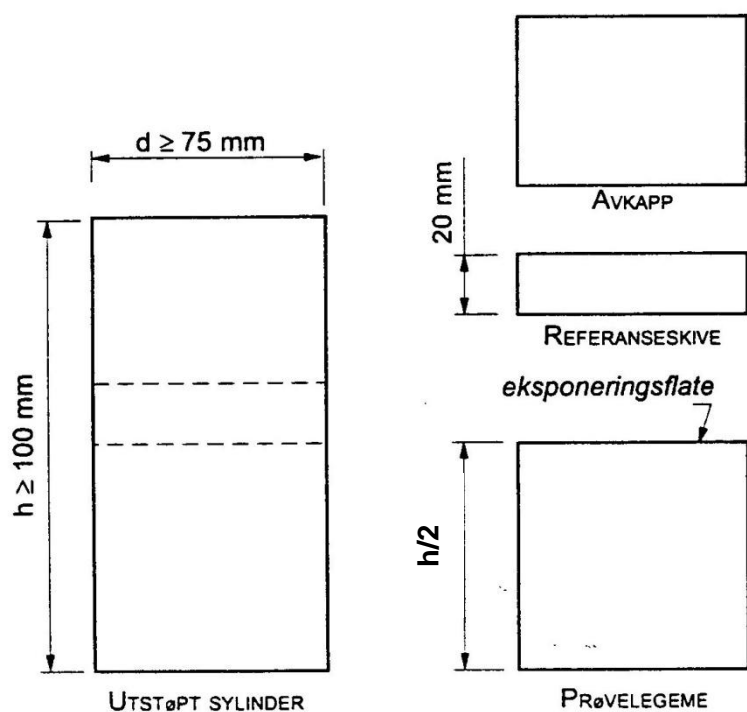
Dersom man benytter en utstøpt sylinder med $h \geq 200 \text{ mm}$, kan denne først deles i to halvdeler før hver halvdel behandles som vist i figur 2.

Fra den resterende del av borekjernen eller sylindere, skal det (i forlengelsen av prøvelegemet) skjæres fra en referanseskive med tykkelse på minst 20 mm. Se hhv fig 1 og fig 2. Dersom det benyttes utstøpte sylindere, er det tilstrekkelig å tildanne en referanseskive pr prøveserie støpt fra samme betongblanding.

En prøveserie skal bestå av minimum 3 prøvelegemer.



Figur 1. Tildanning av prøvelegeme fra utboret kjerne.



Figur 2. Tildanning av prøvelegeme fra utstøpt sylinder.

5.2 Metning av prøvelegemer i Ca(OH)_2 -løsning

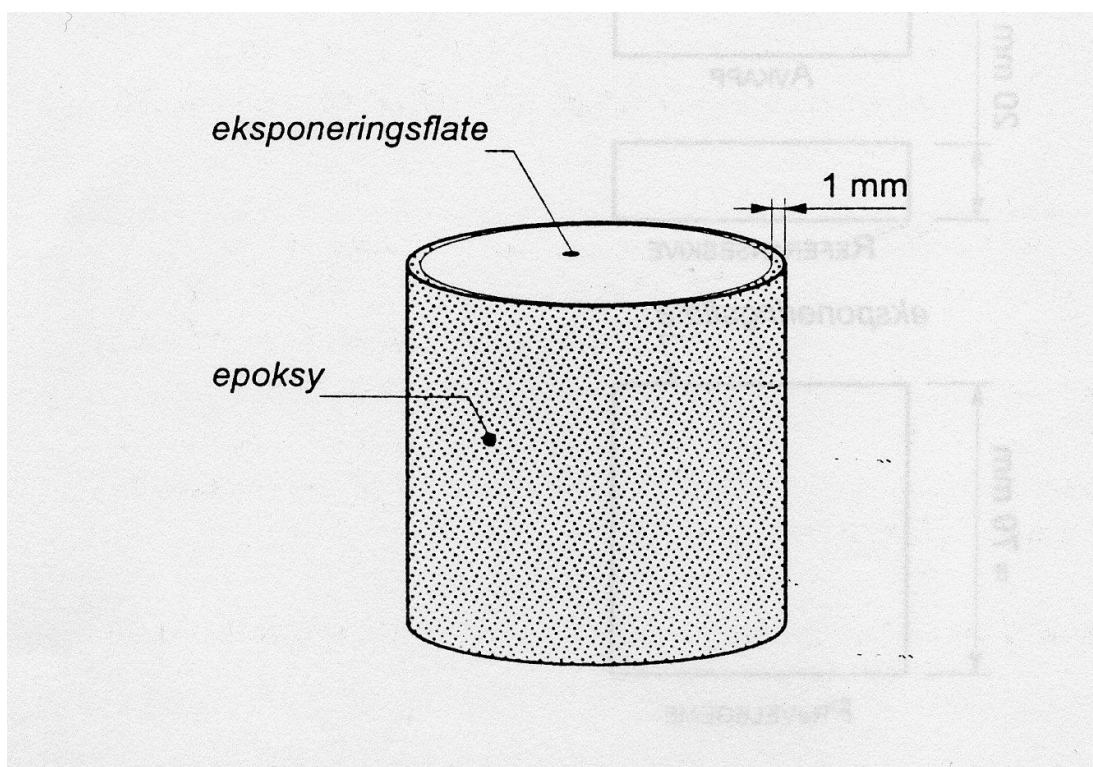
Prøvelegemet legges ned i en mettet Ca(OH)_2 -løsning (2g Ca(OH)_2 pr liter vann) ved 20-23 °C i en tett, lukket beholder. Beholderen skal fylles helt opp med Ca(OH)_2 -løsning og dekket med lufttett lokk for å minimalisere karbonatisering av væsken.

Etter ett døgn tas prøvelegemet opp av løsningen. Med en klut som er vætet i den samme løsningen som prøvelegemet har ligget, og deretter vridd, tørkes prøvelegemet slik at fri Ca(OH)_2 -løsning fjernes fra overflata. Prøvelegemet veies, og vekten noteres som m_{ot} . Prøvelegemet legges tilbake i Ca(OH)_2 -løsningen.

Lagringen i Ca(OH)_2 -løsningen fortsetter inntil m_{ot} ikke endres mer enn 0,1 vekt% i døgnet.

Når m_{ot} er stabil legges prøvelegemet i klimarom ved 50 % RF og temperatur 20°C i 4 timer, før prøvelegemet belegges med epoksy på alle frie flater, bortsett fra eksponeringsflata (jfr pkt 5.1). Epoksybelegget legges dog med 1 mm overlapping inn på eksponeringsflata (se fig 3). Påføring og herding av epoksybelegget skal skje iht leverandørbeskrivelsen.

Når epoksybelegget er herdet legges prøvelegemet tilbake i Ca(OH)_2 -løsningen, inntil m_{ot} stabiliseres som beskrevet over.



Figur 3. Påføring av epoksy på prøvelegeme.

6 Prøving

Dokumentasjon av prøvingen føres på eget skjema som vist i Vedlegg 1.

6.1 Framstilling og kontroll av eksponeringsvæsken.

Eksponeringsvæsken framstilles som en løsning av destillert eller deionisert vann og NaCl, med en konsentrasjon på $165 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ NaCl pr liter løsning. Forholdet mellom eksponeringsareal i cm^2 og eksponeringsvæsken i dm^3 skal være mellom 20 og 80. (Dette tilsier at 1 serie á 3 paralleller á $\varnothing 100$ mm skal neddykkes i 3-12 liter NaCl-løsning)

Løsningens NaCl-konsentrasjon skal kontrolleres minst en gang før, en gang under og en gang etter eksponeringen. Dersom konsentrasjonen avviker mer enn $\pm 3 \text{ g}$ NaCl pr liter oppløsning, skal eksponeringsvæsken justeres til $165 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ NaCl pr liter løsning. Kontroll av eksponeringsvæsken utføres ved potensiometrisk titrering iht NS 3671 eller ved spektrofotometer iht til KS 14-05-04-108.

Eksponeringsvæskens temperatur skal være $23 \pm 2^\circ\text{C}$ med en middeltemperatur på 23°C . Temperaturen skal måles minst en gang pr døgn.

6.2 Eksponeringen

Prøvelegemet tas opp fra Ca(OH)_2 -løsningen og tørkes med en fuktig klut til overflatetørr tilstand, som beskrevet i pkt 5.2, andre avsnitt.

Prøvelegemet legges deretter ned i NaCl-løsningen, og lagres her i minst 35 døgn. Forholdet mellom eksponeringsareal i cm^2 og NaCl-løsning i dm^3 skal være mellom 20 og 80. Dette tilsier at en serie á 3 parallelle sylindre med diameter 100 mm skal neddykkes i 3-12 liter NaCl-løsning.

6.3 Måling av kloridinnhold

Etter ønsket eksponeringstid (≥ 35 døgn) tas prøvelegemene opp av løsningen. Fresing av 1 mm tykke sjikt skal utføres samme dag (innen 4 timer etter at prøvene er tatt opp av NaCl-løsningen). Dersom det ikke lar seg gjøre å frese prøvene på det på forhånd avtalte tidspunkt, skal prøvene oppbevares i NaCl til fresing kan utføres. Tidspunkt for opptak fra NaCl-løsning og fresing skal noteres.

Det skal freses av betongstøv i sjikt parallell med eksponeringsflata. Antallet sjikt bestemmes av kloridinntrengingsdybden og skal være tilstrekkelig til at en utflating av kloridprofilet kan registreres. Avfresingen skal foretas innenfor en diameter som er minst 10 mm mindre enn prøvelegemets fulle diameter. Hvert sjikt skal som hovedregel ha en tykkelse på 1 mm. I spesielle tilfeller kan sjikttykkelsen, etter nærmere vurderinger, velges til 0,5 mm eller 2 mm. Dybden under eksponert overflate bestemmes som gjennomsnittet av 5 jevnt fordelte målinger, med en nøyaktighet på minst 0,1 mm.

Den 20 mm tykke referanseskiven knuses til betongstøv for bestemmelse av opprinnelig kloridinnhold.

Syreoppløselig kloridinnhold bestemmes for hvert sjikt, C_x , ved spektrofotometrisk analyse (Intern prosedyre KS 14-05-04-108).

7 Beregning av resultater

7.1 Teori

De målte kloridinnhold tegnes opp som funksjon av dybden under eksponeringsflata.

Kloriddiffusjonskoeffisienten, D_{Cl} , beregnes med bakgrunn i Ficks 2. lov:

$$\frac{dC}{dt} = D_{Cl} \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (1)$$

Løsningen av Ficks 2. lov gir kloridinnholdet som funksjon av eksponeringstiden, t , og avstanden fra eksponeringsflata, x :

$$C(x, t) = C_0 - (C_0 - C_i) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{Cl} \cdot t}}\right) \quad (2)$$

hvor:	$C(x, t)$	=	Kloridinnhold målt i dybden x etter eksponeringstiden t
	C_0	=	Beregnet kloridkonsentrasjon i overflata, $x = 0$
	C_i	=	Opprinnelig (initielt) kloridinnhold i betongen
	x	=	Avstand fra eksponeringsflata
	D_{Cl}	=	Kloriddiffusjonskoeffisient
	t	=	Eksponeringstid
	erf	=	Feilfunksjonen

Feilfunksjonen løses iht [2], som:

$$\operatorname{erf}(x) = 1 - (1 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4)^4$$

hvor:	a_1	=	0,278393
	a_2	=	0,230389
	a_3	=	0,000972
	a_4	=	0,078108

Klorid-inntrengingshastigheten under forsøket beregnes ved at summen av målt kloridinnhold i alle sjikt (omregnet til g/m^3) summeres. Bakgrunnsverdien trekkes fra de målte verdier. Total mengde inntrengte klorider omregnes til g/m^2 .

Den totale inntrengingen av klorider pr flateenhet dividert med forsøkets eksponeringstid defineres som inntrengingshastigheten (v_i).

7.2 Beregningsprogram

Verdiene av C_0 og D_{Cl} bestemmes ved å tilpasse ligning (2) til de målte kloridinnhold ved ikke-lineær regresjonsanalyse etter minste kvadraters metode. Profilets første punkt, bestemt fra det første avfreste sjiktet, utelates fra regresjonsanalysen. De øvrige punkter vektlegges likt.

Beregninger av C_0 og D_{Cl} utføres ved bruk av regnearksprogrammet Kloriddiffusjon.xls i Microsoft Excel. Oppdatert utgave av regnearket ligger på i:\regneark\. Det skal framgå av rapporten hvilken versjon av programmet som er benyttet.

De beregnede verdier angis som følger:

- C_0 angis med 3 desimaler, som % av tørr betongvekt
- D_{Cl} angis med 2 signifikante siffer, som $10^{-12} \text{ m}^2/\text{sek}$
- v_i angis som $10^{-6} \text{ g/m}^2 \text{ sek}$

8 Prøvingsrapport

Prøvingsrapporten skal framstille de målte kloridprofilene i tabellform og grafisk.

Videre skal beregnet kloridkonsentrasjon i overflata (C_0), effektiv kloriddiffusjonskoeffisient (D_{Cl}) og inntrengingshastighet (v_i) presenteres i tabellform.

Beregnete kloridprofiler (på bakgrunn av C_0 og D_{Cl}) skal framstilles grafisk i samme figur som målte kloridprofiler.

Resultatene kan vurderes i forhold til erfaringstall fra tidligere utførte analyser, eller relateres til en referansebetong som er en del av den aktuelle prøveserie.

Oppdragsgiver				Prosjektnr		Oppdragsnr	
KLORIDINNTRENGING - APM302 - KS70 126							
Prøvestk, antall/merking							
Nedlagt i Ca(OH)_2 (før påføring av epoksy) utført dato/sign				Epoksy påført, dato/sign			
				Nedlagt i Ca(OH)_2 (etter påføring av epoksy) dato/sign			
Veiing, dato	Pr 1 mrk	Pr 2 mrk	Pr 3 mrk	Veiing dato	Pr 1 mrk	Pr 2 mrk	Pr 3 mrk
Nedlagt i saltløsning, dato/av							
Saltløsning kontrollert			Pr mrk	Opp av saltløsn.		Fresing utført	
Dato	Resultat	Av		Dato - kl		Dato - kl	
			1				
			2				
			3				
Temperatur i saltløsning målt med (angi utstyr, internt reg.nr og intervall)							
Fresing utført av		Antall sjikt		Kommentarer			
		Total dybde					
Frest støv levert til _____ for analyse dato/sign							
Kontrollert, dato/sign verksmester							

Vedlegg H – Spektrofotometrisk metode for bestemmelse av totalt kloridinnhold i betongstøv

1 Formål og bruksområde

Prosedyren beskriver en spektrofotometrisk metode for bestemmelse av totalt kloridinnhold i betongstøv. Metoden er gyldig opp til 2 % Cl⁻ av betongvekt. Prosedyren skal følges dersom ikke annet er avtalt mellom saksbehandler og oppdragsgiver.

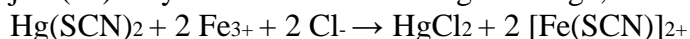
2 Referanser

Metoden bygger på en analyseprosedyre beskrevet i Vogels bok, "Textbook of Quantitative Inorganic Analysis" - Forth Edition 1978. p 754 - 755; "B. Mercury(II) thiocyanate method".

3 Kort beskrivelse av metoden

Betongstøv oppsluttes i fortynnet salpetersyre ved 80 °C. 2 - 4 ml av oppslutningen filtreres gjennom et membranfilter etter minimum en times henstand ved romtemperatur. 250 µl av filtratet overføres til en 10 ml målesylinder og tilsettes en fast mengde reagenser og destillert vann. Reagensene og kloridionene danner kvikksølvklorid og kompleksionet

jern(III)tiocyanat som er brun orange av farge;



Intensiteten av fargen øker med kloridinnholdet i blandingen. Absorbans av lys med bølgelengde 460 nm i løsningen måles med et spektrofotometer. Deretter sammenholdes verdien med tilsvarende verdi fra en kalibreringskurve, kloridinnholdet for løsningen i kuvetten beregnes og herav totalt kloridinnhold for støvprøven når vekt og fuktighet i denne er kjent.

4 Nødvendig utstyr

4.1 Laboratorieutstyr

1. Vekt, minste avlesning 0,01 g
2. Spektrofotometer innstilt på bølgelengde 460 nm
3. Begerglass, 2000 ml høy form
4. Begerglass, 150 ml høy form.
5. Fullpipette, 50 ± 0,05 ml
6. Målesylinder med propp, 10 ± 0,15 ml
7. Dispenser eller Peleusballong for pipettering.
8. Varmeplate med temperaturstyring
9. Vannbad med temperaturregulator for reagenser
10. Laboratorierører
11. Membranfilter, engangs 0,45µm
12. Mikropipetter (250 og 0 - 1000 µl)
13. Engangssprøyte, 10 ml
14. Engangshansker (kloridfri)
15. Prøveglass

Merk: Glassutstyr som er kalibrert ved en gitt temperatur (vanligvis 20 °C), må ikke tørkes i varmeskap etter rengjøring.

4.2 Kjemikalier

4.2.1 Generelle krav og merknader

Kjemikaliene som brukes, skal være av analysekvalitet. Vannet som brukes, skal være destillert eller av samme renhet. Hvis ikke annet er nevnt, betyr % masseprosent.

Fortynningsgrad av konsentrert syre er gitt i volum. Med for eksempel salpetersyre 1 + 9, menes 1 volumdel salpetersyre fortynnet med 9 volumdeler vann til totalt 10 volumdeler. Reagens 2 i neste avsnitt lages ved å løse 120,6 g ammonium jern(III)sulfat dodecahydrat i nesten 900 ml 9 M HNO₃ i en liter målekolbe som så fylles opp til merket med 9 M HNO₃ etter at løsningene er temperert. En liter ca. 9 M HNO₃ lages først ved å sette 620 ml 65 % HNO₃ til 380 ml vann under omrøring (ikke omvendt rekkefølge).

4.2.2 Reagenser

1. 65 % Salpetersyre, HNO₃, fortynnet 1+9
2. 0,25 M Ammonium jern(III)sulfat dodecahydrat, Fe(NH₄)(SO₄)₂ · 12H₂O, løst i 9 M HNO₃
3. Kvikksølv(II)tiocyanat, Hg(SCN)₂, mettet i 96 % etanol uten denatureringsmiddel.
4. Natriumklorid, NaCl, tørket i minst 2 timer ved 105°C for kalibrering
5. Kontrolløsning 1, Natriumklorid 20 µg/ml Cl⁻ i fortynnet salpetersyre 1+9
6. Kontrolløsning 2, Natriumklorid 500 µg/ml Cl⁻ i fortynnet salpetersyre 1+9

5 Kalibrering

Kalibrering gjøres ved tilsetting av ulike, nøyaktige mengder NaCl til tørr, nedknust referansebetong (ca 5,00 g) med et minimalt kloridinnhold. Minst 10 konsentrasjonsnivåer for Cl⁻ av betongvekt velges i området 0,00 til 2,00 %, hvorav en skal være 0,00 % (ingen tilsetting av NaCl). Ut ifra mengde tilsatt NaCl og de tilsatte væsker beregnes konsentrasjonen av Cl⁻ i kuvetten manuelt. Absorbans avleses på vanlig måte. Minimum 2 uavhengige analyser foretas for hvert av de minimum 10 nivå. Samtlige minimum 20 verdier plottes inn i et XY diagram med konsentrasjon av klorider i kuvetten som y-akse og [(avlest absorbans) – (gjennomsnittlig absorbans for 2 prøver med 0,00 % Cl⁻)] som x-akse. Punktene tilpasses et tredjegradspolynom tvunget igjennom origo; $y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x$. Gjeldende kalibrering er basert på 12 doble punkter og benytter faktorene $a = 1,544 \cdot 10^{-13}$, $b = 6,712 \cdot 10^{-10}$ og $c = 3,361 \cdot 10^{-7}$ med tilpasningsfaktor $r^2 = 0,9995$.

Minst en gang per år foretas kontroll av kalibreringskurven for støvprøver ved tillaging og måling av 4 støvprøver á ca 5,00 g med tilsatt Cl⁻ mengde 0,00 %, ≈0,20 % (≈0,016 g NaCl), ≈0,50% (≈0,041 g NaCl) og ≈1,00% (≈0,082 g NaCl) av betongvekt. To analyser gjøres for hvert nivå. Kloridkonsentrasjonen i kuvetten beregnes manuelt og absorbans avleses. Punktene med $y = \text{kloridkonsentrasjon}$ og $x = [(\text{avlest absorbans}) - (\text{gjennomsnittlig absorbans for 2 prøver med 0,00 \% Cl}^-)]$ plottes inn og det kontrolleres at de ikke avviker nevneverdig fra kalibreringskurven som finnes på regnearket

I:\pro\22m910\50\Konkalib\KalibreringA-20.xls. Eventuell endring av kalibreringskurve må godkjennes av kvalitetsleder.

6 Gjennomføring av analysen

6.1 Preparering av prøver

6.1.1 Prøve fra utboret kjerne.

Vanligvis foretas fresing av 1-3 mm tykke sjikt inn til ønsket dybde. Frest støv legges i merkede plastposer med lås. Alternativt kan kjernen tørrsages i diamantsag med spesielt tørrsagblad til skiver med tykkelse ikke over 7 mm, men tilstrekkelig til å gi minst 10 g nedknust prøve. Hver prøve legges i separate merkede plastposer med lås. Skivene grovknuses

for hånd og nedknuses i kjeftknuser til en D_{\max} på ca 2 mm. Finknusing foregår i skivemølle ned til en finhet som lettest sammenlignes med fint mel. Prøven leveres så til analyselaboratoriet i lukket, merket plastpose. Dette støvet er forutsatt tørket ved 105°C som en følge av prosedyren for finknusingen (dvs ca 0,5 % fuktighet ved analyse).

6.1.2 Prøver direkte utboret fra betongkonstruksjonen

Prøven leveres til laboratoriet i forseglet plastpose påført uttakssted og avstand fra overflate hvor prøven er tatt. Fremgangsmåte for uttak av prøven er beskrevet i egen prosedyre. Før innveiling bør eventuelt større betongbiter siktes fra prøven. Det tas ut en stikkprøve som tørkes til konstant vekt (vanligvis oppnåes det etter 1 time ved 105 °C) før det analyseres. Vekten av støvet (stikkprøven) kontrolleres før (m_f) og etter (m_e) tørking slik at % -vis fuktighet kan beregnes $= (m_f - m_e) \cdot 100\% / m_f$. Fuktigheten inngår i utregningen av kloridinnhold i tørt betongstøv for de øvrige prøver.

6.2 Oppslutning av betongstøv

1. Vei inn ca 5,00 g av betongprøven i et begerglass. Notér nøyaktig vekt.
2. Pipetter ut 50 ml varm (80 °C) fortynnet HNO_3 og tilsett prøven.
3. Rør blandingen i 30 sek med propellrører eller i 2 min for hånd med glasstav.
4. La oppslutningen stå til henstand i minimum 60 minutter og maksimum 3 timer.
5. Ta ut ca 3 – 5 ml av løsningen med en 10 ml engangssprøyte.
6. Monter engangs membranfilter og filtrer ut 2 - 4 ml i et prøveglass.

6.3 Uttak og blanding av analysevæske

1. Før uttaket gjøres bør spektrofotometeret være påslått i minst 20 minutter.
2. Fyll en 10 ml målesylinder med 8,0 ml destillert vann.
3. Bruk mikropipetten og pipetter ut 250 μl fra filtratet i prøveglasset.
4. Pipetter ut 835 μl $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ løst i 9 M HNO_3 og tilsett målesylindren.
5. Pipetter ut 835 μl mettet $\text{Hg}(\text{SCN})_2$ i etanol og tilsett målesylindren.
6. Sett kork på målesylindren og snu denne opp og ned minst 5 ganger for god blanding.
7. Nulløsning (blindprøve) lages på samme måte, men med 8,2 ml destillert vann og uten 250 μl uttak av filtrat.
8. Blandingen skal stå i 10 minutter før måling.

6.4 Spektrofotometermålinger

1. Spektrofotometeret slås på med hovedbryter og det kontrolleres at instrumentet ikke gir feilmeldinger under oppstart.
2. Innstill bølgelengden til 460 nm og la instrumentet stå i minimum 20 minutter før måling.
3. Slå blindprøven i kuvetten og innstill nullnivået for instrumentet.
4. Skyll kuvetten med prøveblandingen.
5. Slå prøveblandingen i kuvetten og sett denne inn i prøvekammeret på spektrofotometeret og avles absorbansen på displayet.
6. Resultatet for prøvens absorbans (ABS) noteres på analyseskjema sammen med prøvens nøyaktige vekt i gram og romtemperatur ved målingen. Punktene 4-6 gjentas for alle prøvene i serien.
7. For beregning av kloridinnholdet i enkeltprøver føres resultatene inn i regnearket **I:\pro\22m910\50\Konkalib\kloridmal2.xls**. For beregning av kloridinnhold i ulike sjikt i en og samme betongkjerne anvendes regnearket **I:\pro\22m910\50\Konkalib\kloridmal.xls**. Disse regnearkene er skrivebeskyttede maler som har tall i grønne celler for verdier som skal endres/kontrolleres, tall i gule celler som kan endres om nødvendig og tall i røde celler som ikke må endres uten etter avtale med kvalitetsansvarlig. Tall i hvite celler er beregnede verdier.

6.5 Spesielle forhold

Hver dag det utføres analyser skal det tas 2 kontrollmålinger av kontrolløsning 1 og 2. Verdiene noteres på analyseskjemaet sammen med instrumentets nullverdi etter nullsetting av nulløsning (blindprøve). Det skal også kontrolleres at vekten av vannet fra dispenseren er 8,00 g \pm 0,05 g (= 8,0 ml). Temperaturen for Hg(SCN)₂-mettet reagensløsning må aldri være mindre enn 20°C. Den skal derfor alltid stå på et temperaturregulert vannbad (23 \pm 1°C), gjerne sammen med Fereagenset. Årsaken er at konsentrasjonen av kvikksølv i den mettede etanol-løsningen er sterkt avhengig av temperaturen. Konsentrasjonen av kvikksølv er målt til henholdsvis 2,64, 2,40 og 1,49g Hg/l ved temperaturene 23,5, 20,5 og 5,0 °C.

7 Presentasjon av resultatene

Dersom prøvene utgjør en profil av forskjellige dybder inn i betong tatt fra en konstruksjon, presenteres resultatene som en grafisk fremstilt kloridprofil med inntrengningsdybde i mm på x-aksen og kloridinnhold i % av betongvekt på y-aksen som angitt i regnearket

I:\pro\22m910\50\Konkalib\kloridmal.xls. For hver ny prøve lagres det modifiserte regnearket med nytt navn under den aktuelle oppdragsfolder. Regnearket genererer et sett x (dybde i mm) og y (kloridinnhold i % av tørt støv) verdier som klippes ut og limes inn i eget regneark for eventuell utregning av diffusjonskoeffisient. Hvis prøvene er utgjør enkeltverdier der profiltilpasning ikke har relevans anvendes regnearket

I:\pro\22m910\50\Konkalib\kloridmal2.xls.

8 Prøvingsrapport

Dersom prøvingen gjelder in-situ kloridprofiler, skal prøvingsrapporten inneholde resultatene

i tabellform med prøvemerking, avstand fra betongoverflata med tilhørende kloridinnhold. Den grafiske fremstillingen av kloridprofilen vedlegges rapporten. Prøvingsrapporten bør også inneholde sammenligninger med de akseptable grenser for kloridinnhold og faregrenser mht armeringskorrosjon.

Dersom det er separate prøver tatt på forskjellige steder på konstruksjonen uten at disse utgjør en del av ett profil av betongen, rapporteres de kun i tabellform og uten sammenligninger mot de nevnte grenseverdier.

Vedlegg I – Datablad Anlegg FA sement

Deklarerte data

Norcem Anleggsement FA tilfredsstiller kravene til Portlandflygeaskesement

NS-EN 197-1-CEM II/A-V 42,5 N

Kjemiske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	370 m ² /kg	
Alkali (ekv Na ₂ O _{ekv})*	0,6 %	
Flygeaske innhold	2,0 %	6 – 20 %
Sulfat (SO ₃)	2,7 %	2 - 3 %
Klorid	< 0,085 %	≤ 0,1 %
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	2,99 kg/dm ³	

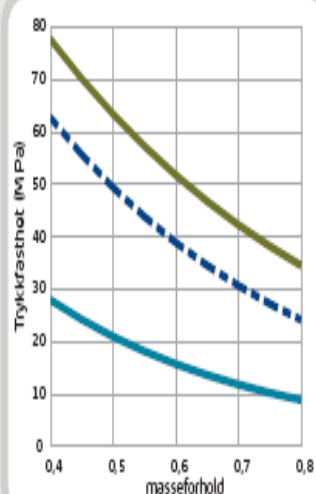
*Alkali innhold i klinkerdel

Fysikalske data

Egenskap	Deklarerte verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	13 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	22 MPa	≥ 10 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	35 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	53 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	165 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1mm	≤ 10 mm

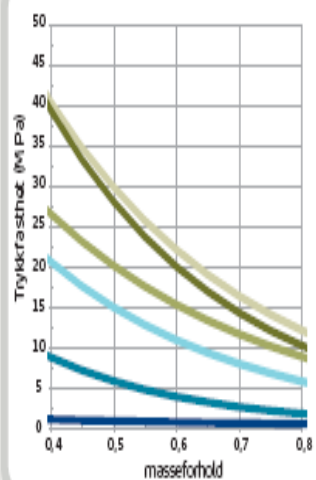
Vedlegg J – Datablad Anlegg sement

Fasthetsutvikling



Figur 1

Tidligfasthet



Figur 2

Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdeforhold (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist trykkfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong med Norcem Anleggsement.

Tidligfasthet

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykkfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Anleggsement. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

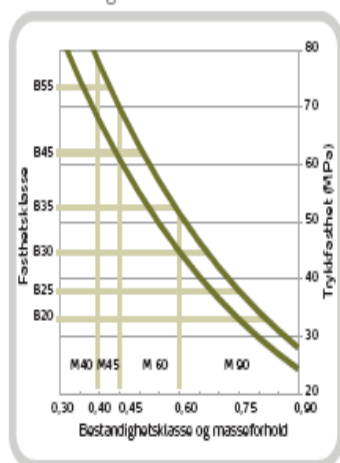
Fasthetsklasse – masseforhold

Med normal, god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca. 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Anleggsement gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,68	0,60	0,51	0,42

Tabell 1

Bestandighetsklasse



Figur 3

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens maksimale masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalte kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsgivende verdier for største masseforhold i de ulike fasthetsklassene er gitt i tabell 1. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighetsklasse og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger. Figuren gjelder for betong med Anleggsement uten luftinnføring.

Anbefalte kombinasjoner

Bestandighetsklasse M60	Fasthetsklasse B30 eller høyere
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B55 eller høyere

Tabell 2

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)

Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	■	■	■	■	■	■
XCI, XC2, XC3, XC4, XF1		■	■	■	■	■
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			■	■	■	■
XF2, XF3, XF4				■		■
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					■	■
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold $v/(c+g_{kp})$	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40

*Minst 4% luft

Tabell 3

Deklarerte data

Norcem Anleggsement tilfredsstiller kravene til Portlandsement

EN 197-1-CEM I 52,5 N

Kjemiske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	360m ² /kg	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O)	0,6 %	≥ 0,07%
Mineralske tilsetninger	4%	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	0,5%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3-4%	≤ 4%
Klorid	< 0,085 %	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	3,14 kg/dm ³	

Fysikalske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1 *
Trykkfasthet 1 døgn	18 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	30 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	46 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	60 MPa	≥ 52,5 MPa
Begynnende bindetid	120 min	≥ 45 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm



PRODUKTBESKRIVELSE

Dynamon SP-G er et svært effektivt superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer.

Produktet tilhører Dynamon-systemet basert på den Mapei-utviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers) der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål.

Dynamon-systemet er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

BRUKSOMRÅDE

Dynamon SP-G er et superplastiserende tilsetningsstoff som brukes for å øke støpeligheiten og/eller redusere tilsatt vannmengde.

Dynamon SP-G er en Dynamon-variant hvor en ved normaldoseringer (0,4-1,5 %) har vesentlig kortere brukstid og også tidligere avbinding enn med **Dynamon SX**-produktene. Produktet egner seg derfor spesielt til støping av golv, der tiden fra utlegging til avslutning ønskes relativt kort.

Dynamon SP-G har likevel en noe lengre brukstid enn **Dynamon SP-3**.

Alle **Dynamon**-produktene skiller seg vesentlig fra superplastiserende tilsetningsstoffer basert på sulfonerte melaminer eller naftalener, og også fra første-generasjon akrylbaserende polymerer gjennom sin betydelig høyere effektivitet som vannreducerer. For høye doseringer kan medføre at betongen separerer.

Dynamon SP-G gir høyere tidligfasthet også ved lavere temperaturer enn andre SP-stoffer. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametere.

Den doseringsmengde som trengs for å oppnå en bestemt støpeligheitt vil være

vesentlig lavere for **Dynamon SP-G** enn for tidligere SP-stoffer. Til forskjell fra konvensjonelle melamin- eller naftalen-baserte superplastiserende tilsetningsstoffer, utvikler **Dynamon SP-G** maksimal effekt uavhengig av tilsetningstidspunkt, men tilsetningstidspunktet kan påvirke nødvendig blandetid.

Dersom **Dynamon SP-G** tilsettes etter at blandevannet er inne, vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandeutstyr.

EGENSKAPER

Dynamon SP-G er en vannløsning av aktive akrylpolymerer som effektivt dispergerer (løser opp) sementklaser. Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpeligheitt. Lavere v/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheiten sammenlignet med betonger med samme v/c-forhold. Fastheten forblir dermed den samme, men muliggjør forenklet utstøping.
3. For å redusere både vann og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke. Gjennom denne metoden kan en blant annet redusere kostnadene (mindre sement), redusere betongens svinn-potensial (mindre vann) og redusere faren for temperaturgradienter pga. lavere hydrasjonsvarme. Spesielt er denne siste effekten viktig ved betonger med større sementmengder.

VÆR OPPMERKSOM PÅ

Dynamon SP-G lar seg kombinere med andre Rescon Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks. styrkningsakselerende stoffer

som **Mapoquick SA** og styrkningsretarderende stoffer som **Mapotard R**.

Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer for produksjon av frostbestandig betong, f.eks. **Mapoair L** eller **Mapoair 25** (type luftinnførende stoff velges ut fra andre tilgjengelige delmaterialer som sementtype og tilslag).

EMBALLASJE

Dynamon SP-G leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, i 1000 liters containere og i bulk.

Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C og bevarer sine egenskaper i minst ett år i lukket emballasje. Fargenyanser kan oppstå i produksjon av polymerene som inngår i **Dynamon EX**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper.

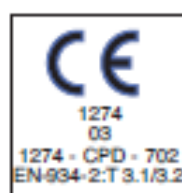
Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent og likevirkende produkt.

Produktet bør ikke utsettes for sollys.

DOSERING

Dynamon SP-G tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpeligheitt, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,3 og 2,0% av sementmengden.

Ved økt dosering økes den åpne tiden noe (tiden betongen lar seg bearbeide).



VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget HMS-datablad. HMS-databladene finnes på www.resconmapei.com

MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.

All overstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Rescon Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.

TEKNISKE SPESIFIKASJONER

Form:	Væske
Farge:	Gulbrun
Viskositet (Brookfield Viscometer DV-1, LV1, 100rpm ved 20±2°C):	Lettflytende; < 30 cP
Tørrestoffinnhold, %:	18,0 ± 1
Spesifikk vekt, g/cm ³ :	1.05 ± 0.02
pH-verdi:	6,5 ± 1
Kloridinnhold, %:	< 0,01
Alkalinnhold (Na ₂ O-ekvivalenter), %:	< 2